

Einflüsse geometrischer Radar- Aufnahmekonstellationen auf die Qualität der kombinativ berechneten Bodenbewegungskomponenten

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt von
Xiaoxuan Yin
aus Peking, Volksrepublik China

genehmigt durch die Fakultät für
Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
13.05.2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnd.dnd.de> abrufbar.

Bibliographic information published by Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnd.dnd.de>.

| | |
|--------------------------------------|--|
| Dekan: | Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Lehmann |
| Vorsitzender der Prüfungskommission: | Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Lehmann |
| Hauptberichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Busch |
| Mitberichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Jens-André Paffenholz |

Dissertation Technische Universität Clausthal 2020

D 104

© **PAPIERGLIEGER VERLAG** GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2020
Telemannstraße 1, 38678 Clausthal-Zellerfeld
www.papierflieger.eu

Urheberrechtlich geschützt, alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2020

ISBN 978-3-86948-761-8

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die bei der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal eingereichte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt zu haben. Die benutzten Hilfsmittel sind vollständig angegeben.

Unterschrift:

Datum:

Zusammenfassung

Die Persistent Scatterer Interferometrie (PSI), ein radarinterferometrisches Verfahren zur Auswertung satellitengestützter Radardaten, ermöglicht die Ableitung von Informationen über Bodenbewegungen mit Sub-Zentimetergenauigkeit, jedoch nur als eindimensionale Größe in der schräg verlaufenden Blickrichtung des Satelliten (line of sight, LoS). Für die Bestimmung der an der Lotrichtung orientierten dreidimensionalen Bodenbewegungskomponenten sind deshalb mehrere solcher LoS-Bewegungsdaten aus unterschiedlichen Blickrichtungen notwendig. Da Radarsatellitendaten vorrangig nur in zwei nahezu diametral gegenüberstehenden Blickrichtungen verfügbar sind, bietet sich für die praktische Anwendung die kombinatorische Berechnung von Bodenbewegungskomponenten mittels LoS-Datensätzen aus sich kreuzenden Tracks (z. B. Ascending- und Descending-Aufnahmen eines Sensors) an. Damit lassen sich Höhenänderungen und die Horizontalbewegungen in der Ost-West-Richtung bestimmen, jedoch unter der Annahme, dass die horizontale Bewegungskomponente in der Nord-Süd-Richtung nicht berücksichtigt wird. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war deshalb die ausführliche Untersuchung und Beurteilung der Qualität dieser kombinatorisch berechneten Bodenbewegungskomponenten, indem ihre annahmebedingten systematischen Abweichungen und statistischen Unsicherheiten durch theoretische Ableitungen und anhand eines praktischen Fallbeispiels quantifiziert wurden. Ergänzend und zum Vergleich erfolgten Untersuchungen von Ergebnissen auf Basis der Einzelaufnahmegeometrie und der kombinatorischen Berechnung mit parallelen Tracks zur Ermittlung von Höhenänderungen.

Mit Hilfe der theoretischen Untersuchungen in dieser Arbeit lassen sich die systematischen Abweichungen in den aus zwei sich kreuzenden Tracks kombinatorisch berechneten Bewegungskomponenten durch das Produkt der konstellationsbedingten ε -Faktoren und der tatsächlichen Nord-Süd-Bewegung darstellen. Durch die Berechnung dieser von Einfallswinkel und Azimut der Blickrichtung der verwendeten Kombination abhängigen ε -Faktoren ist eine erste Beurteilung der Größenordnung der systematischen Abweichungen möglich. Es zeigte sich, dass kombinatorisch berechnete Höhenänderungen im Gegensatz zur Einzelaufnahmegeometrie deutlich geringere systematische Abweichungen aufweisen. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass die kombinatorisch berechnete Ost-West-Bewegungskomponente als frei von systematischen Abweichungen betrachtet werden kann, da die Größenordnung ihres ε -Faktors einen Wert von nahezu Null aufweist. Die statistischen Unsicherheiten der kombinatorisch berechneten Bewegungskomponenten sind abhängig von den Unsicherheiten der benutzten PSI-

Ergebnisse und von der jeweiligen Konstellationsgeometrie. Bei Einfallswinkeln kleiner als 45° besitzt die ermittelte Ost-West-Bewegungskomponente eine höhere statistische Unsicherheit als die Höhenänderung. Die Verwendung von zwei parallelen Tracks zur kombinatorischen Ableitung von Höhenänderungen hat sich gegenüber der kombinatorischen Berechnung mit zwei sich kreuzenden Tracks als weniger vorteilhaft erwiesen, da bei kleinen Einfallswinkeldifferenzen keine Verringerung der systematischen Abweichung erfolgt, aber die statistische Unsicherheit zunimmt.

Abschließend wurden am Beispiel von Datensätzen aus drei verschiedenen Tracks der europäischen Radarsatelliten Sentinel-1A/B die zwei Ansätze der kombinatorischen Berechnung erprobt. Eine Abschätzung der systematischen Abweichungen konnte mithilfe eines vereinfachten Bodenbewegungsmodells für dieses Beispiel erfolgen, während die statistischen Unsicherheiten mittels einer Trendpolynombestimmung bestimmt wurden. Die Ergebnisse bestätigten qualitativ und quantitativ die theoretisch abgeleiteten Aussagen. Anwendungsorientierte Empfehlungen zur Verbesserung der Ergebnisqualität durch Nutzung einer geeigneten Konstellationskombination runden die Arbeit ab. Die durch diese Arbeit vertieften Kenntnisse liefern Anwendern einen wichtigen Beitrag zur quantitativen Einschätzung über die Qualität der kombinatorisch berechneten Bodenbewegungskomponenten.

Abstract

Radar interferometric remote sensing applications, such as the satellite-based PSI, with their potential areal sweep and their quasi-continuous data recording, proved to be reliable for ground movement detection, especially due to their high accuracy (sub-centimeter range). However, the resulting one-dimensional side-looking line of sight (LoS) measurements require further analysis in order to derive three dimensional ground movement components. One of these methods for analysis is here the utilization of decomposition of the movement vectors, by combining cross-heading tracks (Ascending and Descending) in order to differentiate vertical (surface subsidence) and lateral (east-west-movement) displacement. Hereby, as an important assumption, the lateral displacement in north-south direction has to be considered insignificant. Therefore, all measurement uncertainties have to be quantified in order for this approach to be valid for ground movement detection. Consequently, this work investigated and evaluated the quality of ground movement components calculated by decomposition of exactly two cross-heading PSI-LoS-datasets for their systematic deviation and statistical uncertainty. These quality parameters were derived theoretically and were quantified in an example case. Additionally, and as a comparison, similar evaluations were performed for a single LoS-dataset and for the decomposition utilizing two parallel LoS-datasets in order to determine surface subsidence.

Hence, resulting from the theoretical point of view, the systematic deviations for the ground movement components calculated from the decomposition of two cross-heading datasets can be expressed by the multiplication of the constellation depended ε -factor and the true north-south-movement. By calculating these ε -factors, which depend on the incidence angle and the azimuth of the looking direction of the respective constellation combination, it is possible to receive the order of magnitude of systematic deviations prior to performing the full decomposition. Note, this overview confirmed already that the potential systematic deviation for surface subsidence based on decomposition is significantly lower than for single LoS cases. Additionally, the systematic deviation for the decomposed east-west-movement based on the ε -factor's magnitude tends towards zero, which means it is negligible for further considerations. In terms of decomposed components' statistical uncertainties, it can be stated that they depend on the uncertainty of the used PSI-results and the respective constellation combination. Once the incidence angle is smaller than 45° , the east-west-movement's statistical uncertainty will be larger than the surface subsidence one. Furthermore, decomposition using parallel tracks didn't

show an advantage for the reduction of systematic deviations compared to cross-heading, due to unbeneficial constellation combinations with a small difference in incidence angles, thereby retaining a high statistical uncertainty.

Three European Sentinel-1A/B radar satellite's datasets from three different tracks were used to test the two decomposition methods in the example case. A complete assessment of the systematic deviations could be derived by utilizing a ground movement model for the example case. The statistical uncertainties were determined via the trend polynomial, which confirmed qualitatively and quantitatively the theoretical conclusions for the example case. Resulting from this work, recommendations could be established for reaching optimal quality parameters based on the suitable constellation combination chosen in a respective case. The knowledge gathered in this work delivers an important contribution in respect to the application of quantitative decomposition of ground movement components and their quality.

Inhaltverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Zusammenfassung | i |
| Abstract | iii |
| Inhaltverzeichnis | v |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Einführung | 1 |
| 1.2 Motivation und Zielsetzung | 2 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 5 |
| 2 Grundlagen zur Bodenbewegung | 8 |
| 2.1 Boden, Bodenbewegung | 8 |
| 2.2 Bodenbewegungsmessung und -analyse | 13 |
| 3 Grundlagen der Radarinterferometrie | 18 |
| 3.1 Radar mit synthetischer Apertur | 18 |
| 3.1.1 Allgemeines | 18 |
| 3.1.2 Aufnahmegeometrie des SAR-Systems | 19 |
| 3.2 Radarinterferometrie als Messverfahren für die Erfassung von Bodenbewegungen | 26 |
| 3.2.1 DInSAR | 26 |
| 3.2.2 PSI | 30 |
| 3.2.3 Fehlereinflüsse bei der PSI-Auswertung | 32 |
| 3.3 Geometrische Bedeutung der LoS-Bewegung | 35 |
| 3.3.1 Azimut der Blickrichtung | 37 |
| 3.3.2 Einfallswinkel der Blickrichtung | 40 |
| 3.3.3 Projektion einer dreidimensionalen Bewegung auf die Blicklinie | 42 |
| 3.3.4 Bewegungsrichtungsabhängige Empfindlichkeit der LoS-Messung | 45 |
| 4 Theorie zur Bestimmung von Bodenbewegungskomponenten mittels LoS-Messungen | 48 |
| 4.1 Bekannte Verfahren zur Bestimmung der Bodenbewegungskomponenten | 49 |
| 4.1.1 Einzelaufnahmegeometrie | 50 |
| 4.1.2 Zweiaufnahmegeometrie | 52 |
| 4.1.3 Drei oder mehr Aufnahmegeometrie | 54 |
| 4.1.4 Einsatzmöglichkeit für „den allgemeinen Fall“ | 56 |
| 4.2 Bestimmung von Bodenbewegungen mittels einer einzelnen Aufnahmegeometrie | 63 |
| 4.2.1 Funktionaler Zusammenhang | 63 |
| 4.2.2 Systematische Abweichungen infolge der Modellannahme | 65 |
| 4.3 Bestimmung von Bodenbewegungen mittels der kombinativen Berechnung mit zwei sich kreuzenden Tracks | 71 |
| 4.3.1 Funktionaler Zusammenhang | 72 |
| 4.3.2 Systematische Abweichung infolge der Modellannahme | 75 |
| 4.3.3 Statistische Unsicherheit | 100 |
| 4.4 Bestimmung von Bodenbewegungen mittels der kombinativen Berechnung mit zwei parallelen Tracks | 104 |
| 4.4.1 Funktionaler Zusammenhang | 105 |
| 4.4.2 Systematische Abweichungen infolge der Modellannahme | 107 |
| 4.4.3 Statistische Unsicherheit | 112 |
| 5 Durchführung und Analyse von kombinativen Berechnungen mit unterschiedlichen, realen Aufnahmegeometrien zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten | 114 |
| 5.1 Beschreibung der verwendeten Datensätze | 115 |
| 5.1.1 Radardaten | 115 |
| 5.1.2 Digitales Höhenmodell | 119 |
| 5.1.3 Radarkonstellation | 119 |
| 5.2 Prozessablauf der kombinativen Berechnungen | 121 |
| 5.2.1 PSI-Ergebnisse als Eingangsdaten | 124 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2.2 | Bereinigung der PSI-Ergebnisse..... | 129 |
| 5.3 | Ergebnisse der kombinativen Berechnungen | 135 |
| 5.3.1 | Kombinativ berechnete Höhenänderungen | 137 |
| 5.3.2 | Kombinativ berechnete Ost-West-Bewegungskomponente | 142 |
| 5.4 | Raumzeitliche Analysen der kombinativ berechneten Bewegungskomponenten | 147 |
| 5.4.1 | Jahresscheiben der Höhenänderung und Ost-West-Bewegungskomponente | 147 |
| 5.4.2 | Linien gleicher Höhenänderung und Ost-West-Bewegungskomponente | 152 |
| 5.4.3 | Zeitliche Profile der Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen | 156 |
| 6 | Qualität der kombinativen Berechnungen | 162 |
| 6.1 | Statistische Qualität der Ergebnisse | 163 |
| 6.1.1 | Statistische Unsicherheit der kombinativ berechneten Höhenänderungen..... | 164 |
| 6.1.2 | Statistische Unsicherheit der kombinativ berechneten Bewegungskomponente in der Ost-West-Richtung | 172 |
| 6.2 | Abschätzung der systematischen Abweichungen mittels der ortsabhängigen ε -Faktoren | 177 |
| 6.3 | Abschätzung der systematischen Abweichungen mittels der Nord-Süd-Bewegungs- komponente basierend auf geometrischen Annahmen | 182 |
| 6.3.1 | Charakteristiken der grundlegenden Modellvorstellung | 183 |
| 6.3.2 | Abschätzung der maximalen systematischen Abweichungen des Fallbeispiels | 184 |
| 6.3.3 | Ermittlung der Nord-Süd-Bewegungskomponente mittels der grundlegenden Modellvorstellung | 185 |
| 7 | Zusammenfassung und Empfehlungen | 203 |
| 7.1 | Zusammenfassung | 203 |
| 7.2 | Empfehlung zur Reduktion der statistischen Unsicherheiten | 208 |
| 7.3 | Empfehlung zur Reduktion der systematischen Abweichungen | 209 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 211 |
| | Anhang I: Bodenbewegungsmodell der simulierten Senkungsmulde | 216 |
| | Anhang II: Basisliniendiagramme | 219 |
| | Abbildungsverzeichnis..... | 221 |
| | Tabellenverzeichnis..... | 226 |
| | Symbolverzeichnis..... | 227 |
| | Danksagung | 229 |

1 Einleitung

1.1 Einführung

Jeder anthropogene Eingriff in die Erdkruste und jede geogene Veränderung in der Erdkruste können zu einer dreidimensionalen Deformation der Erdoberfläche führen. Diese Deformationen, häufig als Bodenbewegungen bezeichnet, sind zeitlich variierende, dreidimensionale Verformungen und Verschiebungen der Erdoberfläche. Sie können sowohl kleinräumig (bis zu mehreren Hektaren), als auch großräumig ($\geq 1 \text{ km}^2$) auftreten, und variieren sich zeitlich und räumlich in Abhängigkeit ihrer Ursachen. Diese flächenhaften Deformationen besitzen häufig, in Richtung der Schwerkraft, eine ausgeprägte Senkungskomponente, können sich aber auch, entgegen der Schwerkraft in Form einer Hebung zeigen. Diese Vertikalkomponente einer Verformung wird meist zur Charakterisierung eines sich deformierenden Gebietes in ein Senkungs- oder ein Hebungsgebiet verwendet. In beiden Fällen können aber auch Horizontalbewegungen auftreten, deren Richtung und Größe innerhalb einer horizontalen Bezugsebene orts- und zeitabhängig sind.

Die Erfassung von Bodenbewegungen ist somit generell darauf ausgerichtet, die zeitliche Veränderung der dreidimensionalen Deformation eines flächenhaften Ausschnittes der Erdoberfläche zu bestimmen. Die radarinterferometrischen Verfahren mittels der satellitengestützten, abbildenden Radarsysteme mit synthetischer Apertur (SAR) haben sich dafür als leistungsstarke Technik neben den geodätischen Messverfahren (z. B. Nivellement und GNSS) erwiesen, da sie die Möglichkeit bieten, flächenhaft (je nach Sensor z. B. mit einer Bodenauflösung von $\leq 2 \text{ m}$ bis etwa 100 m) und quasi-kontinuierlich (je nach Sensor eine Aufnahme mindestens alle 6 Tage) Informationen über Bodenbewegungen zu gewinnen. Durch die Analyse von Phasenveränderungen der kohärenten Pixel zwischen verschiedenen Aufnahmezeitpunkten lassen sich die Abstandsänderungen zwischen rückstreuenden Objekten und dem Sensor durch die Ableitung von Interferogrammen erfassen. Diese Phasendifferenzen resultieren zum einen aus der Aufnahmegeometrie und den leicht unterschiedlichen Orbit-Positionen des Satelliten zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten, zum anderen aus der Höhenlage der Gelände- und Objektoberfläche sowie deren Veränderung. Zur Ableitung von deformationsbedingten Abstandveränderungen der rückstreuenden Objekte eignet sich das Verfahren der „Differentiellen SAR-Interferometrie (DInSAR)“, indem durch andere Ursachen erzeugte Phasenteile aus dem Interferogramm herausgerechnet werden. Darüber hinaus können Informationen

über Bodenbewegungen mit der aus DInSAR entwickelten Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) (Ferretti, et al., 2001) als punktbezogene Bewegungszeitreihen abgeleitet werden. Um den Rauschanteil zu reduzieren, werden bei einer PSI-Auswertung nur permanente Rückstreuer (sog. PS-Punkte), die langzeitstabile und starke Rückstreueigenschaften aufweisen, in einem Datenstapel (mit z. B. mindestens 20 Radarszenen) zeitlich analysiert. Durch diese PSI-Analysen ergeben sich Zeitreihen der Bewegungen dieser PS-Punkte, jedoch nur in der Blickrichtung des Satelliten (Line of Sight, LoS).

Eine der wesentlichen Nachteile bei der praktischen Nutzung von solchen LoS-Bewegungen zur Ableitung von Bodenbewegungen besteht darin, dass sie lediglich eindimensionale Informationen in der Blickrichtung des Sensors darstellen, die einer Projektion der dreidimensionalen Punktbewegung auf die Blicklinie des Sensors entsprechen. Für meiste Anwendungen, die einen Bedarf an der Erfassung der Schwerkraft orientierten dreidimensionalen Bodenbewegungskomponenten haben, sind solche LoS-Bewegungen nicht von Interesse. Deshalb sollten bei der Nutzung von LoS-Bewegungen Verfahren sowie Analysetechniken entwickelt und untersucht werden, die es ermöglichen, quantitative Aussagen über die dreidimensionalen Bodenbewegungskomponenten (Höhenänderungen sowie Horizontalbewegungen in Ost-West- und Nord-Süd-Richtung) abzuleiten.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Da die LoS-Bewegungen lediglich in Blickrichtung des Sensors eine eindimensionale Information über die Bodenbewegungen enthalten, müssten mathematisch mindestens drei solcher Informationen aus linear unabhängigen Aufnahmegerichtungen vorliegen, um die drei unbekannten Bodenbewegungskomponenten bestimmen zu können. Hinzu kommen noch geometrische Anforderungen an die relative Orientierung dieser drei gerichteten Größen, um optimale Schnittbedingungen und damit qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen. Aus der Literatur sind Verfahren erkannt, die sich entsprechend der Anzahl verfügbarer LoS-Datensätze aus linear unabhängigen Aufnahmegerichtungen in die folgenden drei Gruppen unterteilt lassen:

- Einzelaufnahmegeometrie
- Zweiaufnahmegeometrie
- Drei oder mehr Aufnahmegeometrie

Bei der Einzelaufnahmegeometrie wird die einzige LoS-Messung in der gesuchten Bewegungsrichtung projiziert, z. B. auf die Lotrichtung. Dabei muss allerdings die Annahme getroffen werden, dass orthogonal zu dieser Richtung keine Bewegungen aufgetreten sind. Bezüglich der Ableitung von Höhenänderungen

bedeutet dies, dass bei der Umrechnung ein Anteil von eingetretenen Horizontalbewegungen in den LoS-Daten vernachlässigt wird und somit mit in die berechneten Höhenänderungswerte einfließt. Da in den meisten Fällen flächenhafte Senkungen und Hebungen mit Horizontalbewegungen einhergehen, führt eine solche Umrechnung zu ortsabhängigen, systematischen Abweichungen in den berechneten Höhenänderungen.

Bei der Zweiaufnahmegeometrie stehen zwei LoS-Datensätze aus zwei verschiedenen Aufnahmerichtungen zur Verfügung. Aufgrund der aufsteigenden (Ascending) und absteigenden (Descending) Flugrichtung eines Radarsensors können zwei unabhängige Datensätze in diesen zwei unterschiedlichen Aufnahmerichtungen vorliegen, aus denen zwei LoS-Bewegungen abgeleitet werden können. Sie bilden die Grundlage für die „kombinative Berechnung“ von Bodenbewegungskomponenten unter Berücksichtigung der beiden nahezu diametral ausgerichteten Aufnahmerichtungen. Hierbei wird dieser Fall in dieser Arbeit als die „kombinativen Berechnung“ mit sich kreuzenden Tracks bezeichnet. Die Blickrichtungen der beiden Aufnahmen sind sich auf der horizontalen Ebene in der Ost-West-Richtung aufeinander zu gerichtet und weichen geringfügig (um ca. $8^\circ - 12^\circ$) von dieser Richtung ab. Somit ist es möglich, auf dieser Grundlage die Höhenänderung und die Ost-West-Bewegungskomponente kombinativ zu berechnen, jedoch ohne Berücksichtigung einer möglichen Horizontalbewegung in Nord-Süd-Richtung, für die bei dieser Konstellation der Sensor in beiden Aufnahmerichtungen nahezu unempfindlich ist. Die beiden, auf Grundlage der beschriebenen Zweiaufnahmegeometrie kombinativ berechneten Bodenbewegungskomponenten können wegen der Vernachlässigung der Nord-Süd-Bewegungskomponente lokal unterschiedlich, systematisch verfälscht sein.

Liegen drei LoS-Datensätze aus drei linear unabhängigen Aufnahmerichtungen vor, ist mathematisch eine Bestimmung der drei Bewegungskomponenten durch Auflösung des Gleichungssystems mit drei linear unabhängigen Gleichungen eindeutig und ohne die zuvor gemachten Annahmen möglich. Liegen mehr als drei LoS-Datensätze aus einer entsprechenden Anzahl unterschiedlicher Aufnahmerichtungen vor, so kann, wegen der Überbestimmung, mit Verfahren der statistischen Parameterschätzung je nach Kondition der Koeffizientenmatrix des linearen Gleichungssystems eine Genauigkeitssteigerung für die berechneten Bodenbewegungskomponenten erreicht werden.

Eine korrekte Bestimmung der dreidimensionalen Bewegungskomponenten erfordert, wie zuvor erwähnt, mindestens drei richtungsverschieden aufgenommene und zusätzlich sich räumlich, zeitlich überlappende LoS-Messungen. Diese Voraussetzung wurde sowohl wegen der begrenzten Verfügbarkeit von Radardaten als auch deren Kosten bisher nur in Sonderfällen erfüllt. Lediglich in

einigen wenigen Forschungsarbeiten (z. B. (Fuhrmann & Garthwaite, 2019), (Samsonov & d'Oreye, 2012)) wurde über die Nutzung von drei oder mehr, zeitlich und räumlich überlappenden Datensätzen berichtet. In der Praxis wurde in der Vergangenheit (und bis in die heutige Zeit) für fast alle Anwendungsfälle nur ein Datensatz in einer Blickrichtung verwendet oder es wurde, trotz der Bestellbarkeit weiterer Datensätze, meist aus Kostengründen auf die Beschaffung und Auswertung weiterer Datensätze verzichtet. Somit wurde bewusst in Kauf genommen, dass mit den erzielten Ergebnissen in nur einer Aufnahme-richtung keine belastbaren und messtechnischen Ansprüche genügenden Aussagen über dreidimensionale Bodenbewegungen (und ihre Komponenten) erzielbar waren. Seit 2014 hat sich diese Situation durch den Start des Sentinel-1A – Satelliten und später des Sentinel-1B – Satelliten verändert. So werden durch beide Satelliten für Europa nahezu flächendeckend und automatisch Datensätze erhoben, die zurzeit jedem Anwender kostenlos zur Verfügung stehen. Hierdurch bieten sich neue Chancen für eine vermehrte Anwendung einer kombinativen, mindestens bidirektionalen Berechnung der Bodenbewegungskomponenten, da nun für europäische Gebiete räumlich und zeitlich überlappende SAR-Aufnahmen aus den aufsteigenden und absteigenden Flugrichtungen vorliegen.

Die bisherigen Untersuchungen wurden hauptsächlich an der Ermittlung der Bewegungskomponenten mittels verschiedener Kombinationen von LoS-Messungen konzentriert. Über den systematischen Abweichungen beim Einsatz der Einzelaufnahmegeometrie wurde zunehmend in vielen Veröffentlichungen (z. B. (Samiee-Esfahany, et al., 2009), (Busch, et al., 2016)) berichtet, wie auch durch Simulation (z. B. (Fuhrmann & Garthwaite, 2019)) visualisiert. Die Verfahren mittels der Zweiaufnahmegeometrie wurden überwiegend nur in Kombination mit anderen Messergebnissen aus z. B. GNSS und / oder Nivellements zur Ermittlung von dreidimensionalen Bewegungskomponenten weiterentwickelt. Auf deren Fehlereinflüsse sind nur wenige Veröffentlichungen oberflächlich eingegangen, wobei die Ansätze mit weniger als drei LoS-Messungen als Eingangsdaten ein höheres Potential für einen allgemeinen Anwendungsbedarf darstellen. Darüber hinaus sind die weiteren Entwicklungen auf die statistische Qualität und Verbesserung der Ansätze mit drei oder mehr Aufnahmegeometrien fokussiert, welche allerdings beim (später definierten) allgemeinen Anwendungsfall nur ortsabhängig erfüllt werden können.

Da weiterhin wirtschaftliche Aspekte (z. B. durch kostenlose Bereitstellung der Satellitendaten) entscheidend für die breite Anwendung radarinterferometrischer Bodenbewegungsmessungen sind, liegt ein Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Untersuchung und Bewertung von kombinativ berechneten Bodenbewegungs-

komponenten aus nur zwei LoS-Datensätzen (Ascending- und Descending-Flugrichtung). Da die auf Grundlage der Zweiaufnahmegeometrie ermittelten Ergebnisse durch verschiedene Fehler- und Rauscheinflüsse belastet sind, nehmen die Untersuchung systematischer Abweichungen und die Ableitung von Qualitätsaussagen in dieser Arbeit einen breiten Raum ein. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die ausführliche Untersuchung und Beurteilung über die Qualität der basierend auf zwei LoS-Messungen kombinatorisch berechneten Bodenbewegungskomponenten, in dem die annahmehedingten systematischen Abweichungen und statistischen Unsicherheiten sowohl durch theoretische Ableitungen, als auch anhand des praktischen Fallbeispiels quantifiziert werden.

Dazu ist zunächst ein Verfahren zur kombinatorischen Berechnung von Bodenbewegungskomponenten mithilfe von LoS-Daten aus PSI-Auswertungen von Ascending- und Descending-Datensätzen zu entwickeln, welches die Bedürfnisse eines allgemeinen Anwendungsfalles befriedigt. Ferner erfolgt eine ausführliche Herleitung und Diskussion über die systematischen Abweichungen und statistischen Unsicherheiten der ermittelten Bewegungskomponenten bei der Nutzung der Zweiaufnahmegeometrie. Diese Betrachtungen und Untersuchungen schließen ab mit einer Abschätzung der Größenordnung verbleibender systematischer Abweichungen bzw. des Einflusses der vernachlässigten Nord-Süd-Horizontalbewegungskomponente.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein allgemeiner Anwendungsfall definiert. Die Definition dieses allgemeinen Falls soll dazu dienen, die Übertragbarkeit der wissenschaftlichen Ansätze und deren Potential in der Praxis bewerten zu können. Dieser allgemeine Anwendungsfall setzt voraus, dass, für ein beliebiges Gebiet in Mitteleuropa, Radardaten über einen Zeitraum der letzten 10 Jahre und kostenfrei zur Verfügung stehen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Erfassung von „Bodenbewegungen“ setzt eine Definition dieses Begriffes voraus. In Kapitel 2 werden die Bodenbewegungen bzw. die Bodenbewegungskomponenten als die zu messenden bzw. abzuleitenden Größen mithilfe einfacher Modelle erläutert. Eine Beschreibung der charakteristischen Grenzen und Möglichkeiten traditioneller wie moderner, in der Praxis angewendeter Messverfahren zur Erfassung von Bodenbewegungen runden dieses Kapitel ab.

Ferner werden die anwendungsrelevanten Grundkenntnisse und Begriffe der satellitengestützte Radarinterferometrie in Kapitel 3 erklärt. Hierbei wird der Fokus auf den geometrischen Eigenschaften der PSI-Ergebnisse gelegt, womit im

Lauf dieser Arbeit die Ermittlung von Bodenbewegungskomponenten erfolgen soll.

Darauffolgend werden die bekannten Untersuchungen zur Erfassung von Bodenbewegung aus einschlägigen Literaturen rezensiert (Kapitel 4.1). Die Machbarkeit der bestehenden Verfahren ist für den obengenannten allgemeinen Fall zu bewerten. Die Methodik, welche zwei sich kreuzende Aufnahmerichtungen eines Sensors nutzt und daraus die zweidimensionalen Bodenbewegungskomponenten berechnet, wird in Kapitel 4.3 vorgestellt. Dabei werden insbesondere die systematischen Einflüsse der Konstellationen der Eingangsdaten durch Theorie und Simulation untersucht, um die Aussage über die systematischen Abweichungen in den somit ermittelten zwei Bewegungskomponenten zu treffen. Zusätzlich wird in Kapitel 4.4 auf den Ansatz der Zweiaufnahmegeometrie, allerdings mit parallelen Tracks, eingegangen. Da für diese Konstellationskombination in vielen Gebieten, die den allgemeinen Fall erfüllen, Datensätze von Sentinel-1-Satelliten vorliegen und mathematisch die Höhenänderung unter bestimmten Bedingungen weitestgehend frei von systematischen Fehlern erfasst werden könnte, wird dieser Ansatz hinsichtlich systematischer Fehlereinflüsse und statistischer Unsicherheit untersucht. Bei beiden Ansätzen sind Vorschläge über die Datenauswahl zwecks der Reduktion der systematischen Abweichung und statistischen Unsicherheit zu treffen.

In Kapitel 5 werden Bodenbewegungskomponenten mittels der in Kapitel 4.3 und 4.4 vorgestellten Theorien mit realen Daten in einem Fallbeispiel berechnet. Dabei werden zunächst die Prozessabläufe für die Bearbeitungen mit realen Daten vorgestellt. Die Ergebnisse der verschiedenen kombinativen Berechnungen werden gegenübergestellt. In Kapitel 5.4 erfolgt dann die spatio-temporale Analyse hinsichtlich der statistischen Unsicherheit der kombinativ berechneten Bewegungskomponenten. Dadurch ergibt sich der Überblick über die Bodenbewegungssituation des Fallbeispiels, welcher zur Abschätzung der systematischen Abweichung dienen soll.

In Kapitel 6 ist die Qualität der kombinativ berechneten Bewegungskomponenten des Fallbeispiels zu untersuchen. Die statistische Unsicherheit dieser Ergebnisse wird in Kapitel 6.1 im Hinblick auf die zuvor erläuterte Theorie analysiert, wodurch die statistische Qualität bzw. die Verwendbarkeit der jeweils ermittelten Bodenbewegungskomponenten bewertet werden kann. Mithilfe der in Kapitel 5.4 ermittelten Bodenbewegungssituation werden die konstellationsbedingten systematischen Abweichungen in den mittels sich kreuzender Tracks kombinativ berechneten Bodenbewegungskomponenten größenordnungsgemäß abgeschätzt. Darüber hinaus wird die Nord-Süd-Bewegungskomponente unter Nutzung von einer geometrischen Modellvorstellung ermittelt. Mit den daraus

berechneten systematischen Abweichungen schließt diese Arbeit ab. Eine Zusammenfassung und die Empfehlungen zur Datenauswahl werden in Kapitel 7 dargestellt.

2 Grundlagen zur Bodenbewegung

Die Erfassung von Bodenbewegungen, als Ziel einer messtechnischen Aufgabenstellung, setzt das Verständnis und damit die Definition von „Bodenbewegungen“ voraus. So unterschiedlich wie die Ursachen und Betrachtungsaspekte von Veränderungen an der Erdoberfläche sind, so unterschiedlich sind auch das Verständnis und die Verwendung des Begriffes Bodenbewegung. In diesem Kapitel soll deshalb erläutert werden, was in dieser Arbeit unter Bodenbewegung verstanden wird und wie ihre Komponenten definiert werden. Dieses Verständnis ist gleichzeitig Grundlage für die zu beachtende Vorgehensweise bei der messtechnischen Erfassung der Bodenbewegungen bzw. ihrer Komponenten. Zudem werden die Bodenbewegungskomponenten mithilfe eines vereinfachten Modells erläutert, wodurch abschließend die Verfahren zur Erfassung von Bodenbewegungen eingeführt werden.

2.1 Boden, Bodenbewegung

Das Verständnis des Begriffes „Bodenbewegung“, erfolgt nur an wenigen Stellen definiert. Auffällig ist, dass der Begriff „Bodenbewegung“ meistens im Bereich des Markscheidewesens und der Geodäsie verwendet wird. Nach dem markscheiderischen Aspekt wird Bodenbewegung in DIN 21917 (Deutsches Institut für Normung e. V., 1999) als „die Gesamtheit aller bergbaulich, geologisch oder hydrologisch verursachten Form- und Lageänderungen (Bewegungsvorgang) an der Tagesoberfläche“ beschrieben. Hierbei definiert sich die Bodenbewegung hauptsächlich durch drei Aspekte: Ursachen, Bewegungsvorgang und bewegende Objekte. Zum einfacheren Verständnis kann dieser Prozess zunächst durch das Bewegungsverhalten von Punkten aus der durch Bodenbewegung beeinflussten Fläche erklärt werden. Im Falle einer untertägigen Rohstoffgewinnung, der bekanntesten Ursache für Bodenbewegungen, werden sich als Folge der Abbaueinwirkung diese Punkte schräg nach unten zum Abbauschwerpunkt hinbewegen (Kratzsch, 2013). Im Bereich der Geodäsie beschäftigt man sich mit der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche (Deutsches Institut für Normung e. V., 1995b). Daher gehört die Erfassung von Bodenbewegungen, welche zur Veränderung der Erdoberfläche führen, zum Aufgabenbereich der Geodäsie. Im Hinblick auf die geodätische Bedeutung des Bewegungsvorgangs, seien Bodenbewegungen im Wesentlichen als dreidimensionale Verformungen und Verschiebungen der festen Erdoberfläche definiert (Busch, 2011), welche der Form- und Lageänderungen nach DIN 21917 (Deutsches Institut für Normung e. V., 1999) entsprechen. Da eine Bewegung im physikalischen Sinne

die Veränderung mit der Zeit umfasst, ist zusätzlich zu beachten, dass auch Bodenbewegung nicht nur als stationäre Größe betrachtet werden soll, weil sie sich in Abhängigkeit ihrer Ursachen mit der Zeit variieren kann.

Als die summarische Definition aus den obengenannten Fachausdrücken wird die Bodenbewegung im Rahmen dieser Arbeit als zeitlich variierende dreidimensionale Verformungen und Verschiebung der Erdoberfläche und dessen flächenhaften Ausschnitten verstanden, wobei die Ursachen für ihr Auftreten und ihre räumliche und zeitliche Variation geogene und anthropogene Gegebenheiten sind. In den folgenden Absätzen wird diese Definition im Detail dargestellt.

In allen Varianten der Definition von Bodenbewegungen wird die Erdoberfläche bzw. die Tagesoberfläche als bewegendes Objekt bezeichnet. Durch den Begriff „Boden“, der die oberste Schicht der Erdoberfläche ist, wird Bodenbewegung als Oberflächenverformung des Objektes „Erde“ (Busch, 2011) eingeschränkt.

Die Ursachen von Bodenbewegungen befinden sich im Untergrund. Die Ursachen für die Oberflächenverformung der Erdoberfläche lassen sich z. B. entsprechend der Tiefenlage in die folgenden Bereiche unterteilen: Bodenschicht (bis zu einer Teufe von ca. 10 m), Lagerstättenbereich (bis in Teufen von ca. 2 – 5 km) und tiefengeologische Bereiche sowie Störungszonen. Typische Ursachen sind tektonische Ereignisse (geologisch), Grundwasserentnahme (hydrologisch), wie auch untertägige Rohstoffgewinnung und -speicherung (anthropogen). In der Praxis entstehen Bodenbewegungen allerdings aus der Summe von verschiedenen, sich räumlich und zeitlich überlagernden Ursachen, geprägt durch ihr jeweils unterschiedliches (räumliches und zeitliches) Übertragungsverhalten (Busch, 2011).

Der dritte Aspekt in der Definition von Bodenbewegungen liegt an der Beschreibung von Bewegungsvorgängen. Laut der obengenannten Definitionen werden Bodenbewegungen hauptsächlich in zwei Sorten unterteilt: Verschiebungen und Verformungen, welche zum Oberbegriff „Deformation“ im geodätischen Sinne gehören (Welsch, et al., 2000). Hierbei können Verschiebungen unter Lageveränderungen gegenüber der Umgebung verstanden werden, während Verformungen der geometrischen Umbildung eines Objektes entspricht. Für die Beschreibung von Bodenbewegungen können deswegen jeweils die sog. Bewegungsgrößen und Verformungsgrößen verwendet werden. Während die Bewegungsgrößen den räumlichen (dreidimensionalen) Punktlageänderungen und den Komponenten deren Vektoren entsprechen, werden die Verformungsgrößen aus solchen Bewegungsgrößen abgeleitet (Deutsches Institut für Normung e. V., 1999).

Im Hinblick auf die messtechnische Ermittlung von Bodenbewegungen und zum einfacheren Verständnis kann, wie bereits zuvor erwähnt, dieser Prozess zunächst durch das Bewegungsverhalten eines Punktes der durch Bodenbewegung beeinflussten Fläche erklärt werden. Diese Punktbewegung (Abbildung 1) ist als Folge der Abbaueinwirkung also eine gerichtete Größe und seine Richtung hängt von der relativen Lage von Punkt und Abbauschwerpunkt (Ort der Bewegungsursache) ab. Entsprechend der üblichen Nutzung eines übergeordneten (amtlichen) Höhenbezugssystems (z. B. das Deutsche Haupthöhennetz 2016) und eines zweidimensionalen Lagebezugssystems (z. B. UTM- oder Gauß-Krüger-Koordinatensystem) zur Beschreibung einer dreidimensionalen Punktlage lässt sich die dreidimensionale Punktbewegung durch eine vertikale und eine horizontale Bewegungskomponente ausdrücken. Die zweidimensionale horizontale Bewegungskomponente kann zusätzlich, in Anlehnung an das verwendete Lagebezugssystem, in eine Ost-West- und eine Nord-Süd-Komponente aufgeteilt werden. In Abbildung 1 sind diese Bodenbewegungskomponenten am Beispiel einer Senkungsmulde schematisch dargestellt. Ein im Senkungsbereich befindlicher Punkt P hat sich nach einer gewissen Zeit in die Position P' bewegt. Diese, im dreidimensionalen Raum erfolgte Lageverschiebung \vec{d} des Punktes P lässt sich somit als vektorielle Summe der Horizontalkomponente d_{hor} (horizontale Verschiebung) und der Vertikalkomponente d_z (Höhenänderungen) beschreiben.

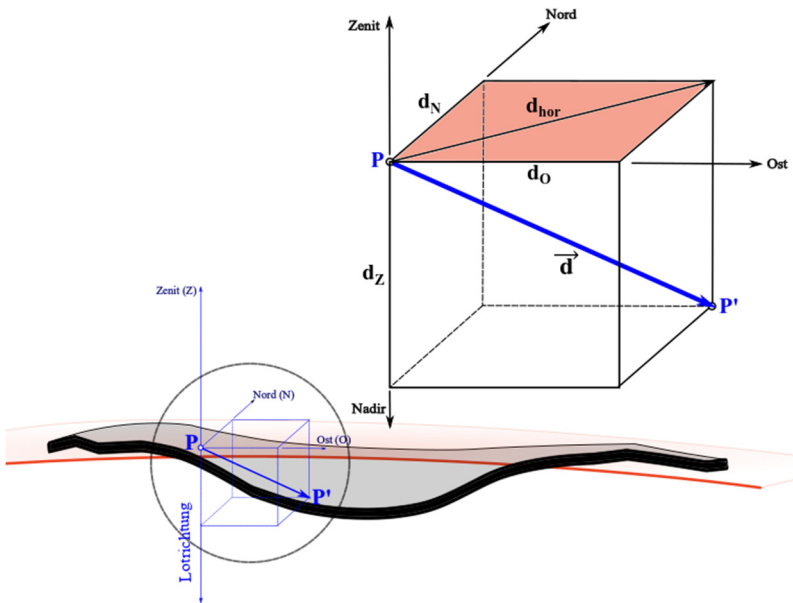


Abbildung 1: Darstellung des dreidimensionalen Bewegungsvektors mit seinen Bewegungskomponenten am Beispiel einer Senkung

Die Vertikalkomponente bezieht sich auf die Lotrichtung, während sich die Horizontalkomponente auf der orthogonal dazu stehenden Bezugsfläche befindet. Diese Horizontalkomponente kann noch in die Nord-Süd-Komponente d_N und die Ost-West-Komponente d_O unterteilt werden. Unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Lage des sich bewegenden Punktes ergibt sich der dreidimensionale Bewegungsvektor $\vec{d}(O, N, Z)$, der sich aus den drei Bodenbewegungskomponenten zusammensetzt.

$$\vec{d}(O, N, Z) = \begin{pmatrix} d_O(O, N, Z) \\ d_N(O, N, Z) \\ d_Z(O, N, Z) \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

Hierbei beschreiben die Koordinaten O, N und Z die Ausgangslage des Punktes vor einer Bewegung, also zu einem Zeitpunkt t_0 . Da die Bodenbewegung \vec{d} sich mit der Zeit entwickelt und somit auch die drei zueinander orthogonal stehenden Bewegungskomponenten, kann die Bodenbewegung an einer Ausgangslage durch eine zeitabhängige Funktion beschrieben werden:

$$\vec{d}(O, N, Z, t) = \begin{pmatrix} d_O(O, N, Z, t) \\ d_N(O, N, Z, t) \\ d_Z(O, N, Z, t) \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

Mit t wird der Zeitraum zwischen einem definierten Ausgangszeitpunkt t_0 und einem beliebigen, nachfolgenden Zeitpunkt t_i (z. B. einem Messzeitpunkt), also $t = t_i - t_0$ bezeichnet.

Zu den Verformungsgrößen gehören die durch die erste oder zweite Ableitung bzw. deren Verhältnisbildung der Bewegungsgrößen enthaltenen Größen. Einige häufig verwendete Begriffe sind in Tabelle 1 aufgelistet, womit die Beziehung zwischen den Bewegungs- und Verformungsgrößen beispielhaft dargestellt werden soll.

Tabelle 1: Auflistung und Beschreibung möglicher Bewegungsarten im Senkungsfall

| Benennung | Formelzeichen | Dimension | Unterteilung |
|-------------------------------------|---|---------------|---|
| Schieflage | d'_Z richtungsabhängig z. B. $d'_{ZN} = \frac{dd_Z}{dN}$ | mm/m oder % | |
| Krümmung | d''_Z richtungsabhängig z. B. $d''_{ZN} = \frac{d^2d_Z}{dN^2}$ | 1/m oder 1/km | konkav: $d''_Z > 0$ konvex: $d''_Z < 0$ |
| Horizontale relative Längenänderung | richtungsabhängig z. B. $d'_O = \frac{dd_O}{dO}, d'_N = \frac{dd_N}{dN}$ | mm/m oder % | Zerrung: $d'_O > 0; d'_N > 0$ Pressung: $d'_O < 0; d'_N < 0$ |
| Schiefstellung | $\frac{dd_O}{dZ}, \frac{dd_N}{dZ}$ | mm/m oder % | |

| | | | |
|---------|--|---------------|--|
| Drehung | $\frac{dd_O}{dN}, \frac{dd_N}{dO}$ | mm/m oder ‰ | |
| Torsion | $\frac{d^2d_O}{dN \cdot dZ}, \frac{d^2d_N}{dO \cdot dZ}$ | 1/m oder 1/km | |

Die Schiefelage ist die erste Ableitung der Höhenänderung nach einer horizontalen Achse, während die Krümmung die zweite Ableitung der Höhenänderung nach einer Horizontalachse ist. Horizontale relative Längenänderung indiziert die horizontale Längenänderung bezogen auf die Längeneinheit. Hierbei sind solche Größen richtungsabhängig und werden unter einer gegebenen horizontalen Richtung berechnet. Meistens werden diese beiden Größen anhand eines Schnittes abgeleitet. Die Horizontalrichtung bezieht sich dann auf die Profilspur des Schnittes. Im folgenden Kapitel 2.2 wird auf die Anforderungen der Messungen für die Deformationsanalyse am Beispiel von bergbaubedingten Senkungen eingegangen.

Nach dieser Charakterisierung des Bodenbewegungsverhaltens mit Raum- und Zeitbezug, drängt sich die Frage nach den Ursachen auf. Traditionell stellt der untertägige Abbau von mineralischen, gasförmigen und fluiden Rohstoffen die bedeutendste Ursache für großflächige Bodenbewegungen in Form von Senkungen an der Tagesoberfläche dar. Je nach abgebautem Rohstoff, der Teufe, Mächtigkeit und der Ausdehnung der abzubauenen Lagerstätte, der eingesetzten Abbautechnologie und der Intensität und dem Zeitraum der Rohstoffgewinnung ergeben sich unterschiedliche Ausdehnungen der Senkungsgebiete sowie Größen und Geschwindigkeiten der Senkungen. Auch wenn der Abbau, vor allem von mineralischen Rohstoffen (z. B. Steinkohle sowie Kali und Salz) in den meisten europäischen Ländern, eingestellt oder stark reduziert wurde, treten weiterhin Bodenbewegungen in den ehemaligen und in den noch aktiven Abbaugebieten auf. Zudem können gewollte oder ungewollte Veränderungen im untertägigen Kräfte- und Spannungsfüge (z. B. durch Flutungen untertägiger Hohlräume infolge Grubenwasseranstiegs) zu Hebungen oder, bei einem Grundwassereintritt, zu meist anhaltenden Senkungen führen.

In den letzten Jahrzehnten sind auch kleinere, früher weniger beachtete Bodenbewegungen insbesondere in bebauten Gebieten in den Fokus öffentlichen Interesses getreten. Sie entstehen durch Bau und Betrieb untertägiger Kavernen- oder Porenspeicher für Erdöl und Erdgas, aber auch durch die Gewinnung von Grundwasser als Trink- und Brauchwasser, durch Entwässerungsmaßnahmen oder beim Tunnelbau für untertägige Verkehrswege oder Entwässerungsanlagen. Diese anthropogenen Ursachen erzeugen während des Betriebes oder Baus flächen-

hafte oder linienförmige Bodenbewegungsgebiete mit lokal und temporär wechselnden Geschwindigkeiten und mitunter auch einem zeitlichen Wechsel von Senkungen und Hebungen.

Ebenfalls entstehen Bodenbewegungen mit sehr kleinen Änderungsgeschwindigkeiten infolge geogener Ursachen, sofern sie nicht infolge eines Erdbebens abrupt auftreten. Beispiele für solche geogenen Ursachen sind durch Niederschlag, Trockenheit und Klimaveränderungen verursachte Feuchtigkeitsänderungen in oberflächennahen und quellfähigen Bodenschichten sowie Änderungen im oberflächennahen Grundwasserstand (auch in der Umgebung von Fließ- und Stillgewässern). Sie können kleinräumig, aber auch großräumig mit lokal und temporär wechselnden Geschwindigkeiten und mitunter auch einem aufeinanderfolgenden Wechsel von Senkungen und Hebungen auftreten. Dies gilt nicht für sehr langsam ablaufende großtektonische Veränderungen, da sie einerseits zu linienförmigen Bodenbewegungsgebieten führen und meist über sehr lange Zeit zu Höhenänderungen aber auch Horizontalbewegungen in stets gleicher Richtung führen.

Die zuvor beispielhaft genannten geogenen Ursachen für Bodenbewegungen können ggf. andere Ursachen für Bodenbewegungen global, regional und lokal im Sinne einer Verstärkung aber auch einer Verringerung der entstehenden Bodenbewegungen überlagern. Gerade in bebauten Gebieten kann es zu weiteren meist kleinräumigen, mitunter objektbezogenen Höhenänderungen (wie an einem einzelnen Gebäude) kommen. Die Ursachen hierfür können z. B. langanhaltende Sackungsphänomene in ehemaligen Aufschüttungsflächen sein, Setzungen im Untergrund eines errichteten Gebäudes oder lastbedingte Setzungen eines Verkehrsweges. Solche meist nur sehr kleinräumig, objektbezogen auftretenden Höhenänderungen werden hier nicht zu den Bodenbewegungen in dem definierten Verständnis einer flächenhaften Verformung der Tagesoberfläche gezählt, auch wenn sie diese lokal überlagern und bei der messtechnischen Ermittlung von flächenhaften Bodenbewegungen miterfasst werden können.

2.2 Bodenbewegungsmessung und -analyse

Um einen Fall der Bodenbewegungsmessung beschreiben zu können, muss zunächst eine der häufigsten Ursachen von Bodenbewegungen beispielhaft dargestellt werden. Als Folge untertägiger Rohstoffgewinnung kommt es meistens zu einer Senkungsmulde an der Erdoberfläche. Die Entnahme großer Mengen an Rohstoffen aus dem Erdinneren im Tiefbauverfahren hat einen Hohlraum zur Folge, der sich unter dem Druck der oberen und seitlichen Gebirgsschichten wieder schließt, wenn er nicht sofort nach der Rohstoffentnahme mit Versatz verfüllt

wird (siehe Abbildung 2 nach Kratzsch (2013)). So entstehen die Senkungen der hangenden Gebirgsschichten durch die Hohlraumschließung, welche sich schließlich an der Erdoberfläche als Senkungsmulden oder Senkungströge auswirken. Nach Kratzsch (2013) sind sowohl Vertikalbewegungen als auch Horizontalbewegungen an den Erdoberflächenpunkten in einem Einwirkungsbereich einer Senkungsmulde zu beobachten. Bei einem homogenen und isotropen Untergrund kann dieses Phänomen mit einem vereinfachten Modell, wie in Abbildung 2 dargestellt werden.

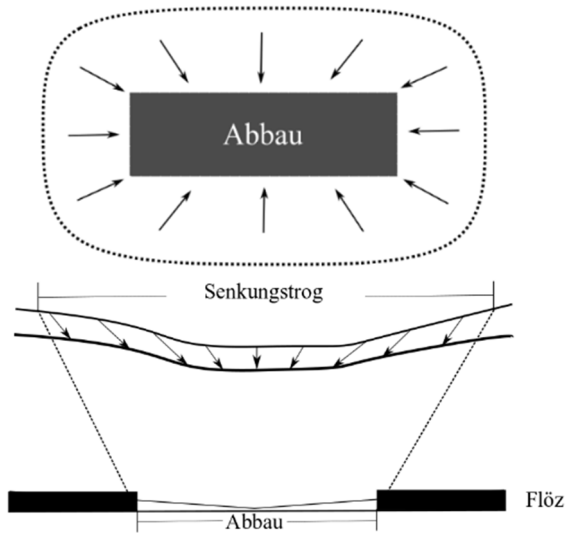


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Senkungstrog nach Rohstoffentnahme unter der Annahme eines homogenen und isotropen Untergrundes (Kratzsch 2013)

Betrachtet man ein Bewegungsprofil vom Senkungsschwerpunkt $d_{Z\ Max}$ zum Rand des Einwirkungsbereichs, erreicht die Horizontalverschiebung das Maximum $d_{hor\ Max}$ im Verlauf des Senkungstrog zwischen dem Senkungsschwerpunkt und dem Rand des Einwirkungsbereichs, etwa oberhalb der Abbaukante bei einer flachen Lagerung (Abbildung 3).

jedoch nur an dieser Stelle. Für die Bestimmung der flächenhaften Verformungen wäre eine Diskretisierung im Raum und damit (je nach Anforderungen) die Installation (und Unterhaltung) einer Vielzahl solcher Sensoren erforderlich.

Eine Lösung dieses messtechnischen Problems ist somit nur möglich durch eine an die Anforderungen des Anwendungsfalles angepasste Diskretisierung in Raum und Zeit. Hierzu sind Kenntnisse über die Lage, Stärke und die zeitliche Variation einer dominanten Entstehungsursache, oder mehrerer sich räumlich und zeitlich überlagernder Entstehungsursachen, sowie das Übertragungsverhalten der Deformationskräfte in der Erdkruste hilfreich und erforderlich. Werden auf Grundlage dieser Kenntnisse z. B. räumlich stark unterschiedliche Verformungswerte erwartet, ist eine hohe räumliche Dichte der zu gewinnenden Daten erforderlich. Dies gilt im Besonderen, wenn Unstetigkeitsbereiche (z. B. infolge tektonischer Störungen) untersucht werden sollen. Kann dagegen von einem räumlich stetigen Verformungsverlauf ausgegangen werden (vgl. z. B. das Modell für einen Senkungstrog) und lässt sich dieses ggf. auch durch ein mathematisches Verformungsmodell (Ursache-Wirkungsmodell) beschreiben, können die räumlichen Abstände der Verformungsmessstellen daran angepasst und größer gewählt werden. Gleiches gilt für die Wahl des erforderlichen zeitlichen Abstandes aufeinanderfolgender Messungen.

Da die Ergebnisse eines Monitorings von Bodenbewegungen rechtliche und wirtschaftliche Konsequenzen haben, kommt den für die Erfassung von Bodenbewegungen einzusetzenden Messtechniken bzw. Messverfahren eine besondere Bedeutung zu. So müssen die erzielten Ergebnisse hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung den gestellten Anforderungen genügen; die Ergebnisse und Aussagen über die eingetretenen Höhenänderungen und Horizontalbewegungen müssen die (definierten, inneren und äußeren) Genauigkeitsvorgaben nachweislich erfüllen und die Ergebnisse müssen frei von systematischen Abweichungen und groben Fehlern sein. Nicht zuletzt deshalb wurden und werden für die Erfassung von Bodenbewegungen bevorzugt geprüfte und anerkannte geodätische Messverfahren eingesetzt. Ihre Einsatzmöglichkeiten sind jedoch, trotz hoher Messqualität, wirtschaftlich wie technisch beschränkt. Alle geodätischen Messverfahren liefern nur einzelpunktbezogene Informationen. Das Nivellement hat sich für die Erfassung von Höhenänderungen an vermarkten Messpunkten bewährt, liefert jedoch nur mittels Modellannahmen des räumlichen Bodenbewegungsverhaltens und hohem Messaufwand verlässliche Informationen über das räumliche Höhenänderungsverhalten und aus wirtschaftlichen Gründen lediglich in größeren Zeitintervallen (mehrere Jahre; in ausgewählten, kleinräumigen Anwendungsfällen 3, 6 oder 12 Monate, oder 2 Jahre) Informationen über das zeitliche Höhenänderungsverhalten. Der Einsatz von GNSS-Empfängern liefert

quasi-kontinuierlich, qualitativ meist ausreichende Informationen über alle dreidimensionalen Bodenbewegungskomponenten, erfolgt aber aus wirtschaftlichen Gründen in der Praxis nur an ausgewählten Punkten. Somit sind flächenhafte Aussagen über das Bodenbewegungsverhalten mit dieser Technik kaum möglich.

Die Erhöhung der Vollständigkeit solcher Bodenbewegungsanalysen, bedeutet für die klassischen Messverfahren meistens eine geringe Wirtschaftlichkeit. Als eine fernerkundliche Methode können die radarinterferometrischen Verfahren, wie z. B. Persistent Scatterer Interferometrie (PSI), welche die Abstandsänderungen von reflektierenden Objekten zu Sensoren erfasst, die für Bodenbewegungsanalysen benötigten Punktmessungen in einer ausreichenden Menge, insbesondere in dicht bebauten Gebieten, mit relativ hoher Messqualität und geringeren Kosten liefern. Im Kapitel 3 wird die Grundlagen und Eigenschaften zur satellitengestützten Radarinterferometrie als eine Erfassungsmethode von Bodenbewegungen vorgestellt.

3 Grundlagen der Radarinterferometrie

Als Einstieg werden die anwendungsrelevanten Grundkenntnisse und Begriffe der satellitengestützte Radarinterferometrie in diesem Kapitel erklärt. Dies ist die Voraussetzung, um anschließend auf die Erfassung von Bodenbewegungen und die Verfahren zur Bestimmung der Bodenbewegungskomponenten eingehen zu können.

Zunächst wird das aktive satellitengestützte Radarsystem mit synthetischer Apertur (SAR) abstrakt vorgestellt, mit der vorrangigen Beschreibung der Parameter der Aufnahmekonstellation, sowie der geometrischen Auflösung. Die Ausführungen in diesem Kapitel legen den Grundstein für die in dieser Arbeit relevante Problemstellung, wobei allgemeine Grundkenntnisse zur Thematik als bekannt vorausgesetzt sind. Einstiegsliteratur zur Prozessierung von SAR-Daten und Radarinterferometrie ist beispielsweise bei den folgenden Autoren zu finden: Woodhouse (2005), Klausning & Holpp (2000) und Hanssen (2001).

Daraufhin werden die radarinterferometrischen Erfassungsmethoden mit SAR, wie z. B. die differentielle Radarinterferometrie (DInSAR) und Persistent Scatterer Interferometrie (PSI), eingeführt. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird der Fokus auf das PSI-Verfahren aufgrund seiner Eigenschaft als ein punktbezogenes Messverfahren und dessen hoher statistischen Qualität gelegt.

Hierbei spielen die geometrischen Eigenschaften der Radaraufnahmen bei der Ableitung von Bodenbewegungen eine entscheidende Rolle, daher liegt der Fokus auf dem Verständnis der Aufnahmegeometrie. Ferner ist PSI ein Abstandänderungen messendes Verfahren. Dabei beziehen sich die gemessenen Abstandänderungen lediglich auf der Blickrichtung des Radarsensors, d. h. es wird nur eine eindimensionale Messgröße an jedem Persistent Scatterer (PS-Punkt) ermittelt. Deshalb ist auf die für die Ermittlung der Bodenbewegungen relevanten Umrechnungen einzugehen, so dass die dadurch bedingte Problemstellung für diese Arbeit letztlich eingeführt werden kann.

3.1 Radar mit synthetischer Apertur

3.1.1 Allgemeines

Radar steht für den englischen Begriff „Radio detection and ranging“ und basiert auf dem Messprinzip der Echoortung, bei dem die Echos der ausgesendeten Signale gemessen werden. Als der Träger der Signale werden elektromagnetische

Wellen im Mikrowellenbereich von 300 - 1 GHz verwendet, wobei der Frequenzbereich in unterschiedliche Radarbänder unterteilt wird. Ein aktives, abbildendes Radarsystem wird auf einem Flugzeug oder Satellit montiert, welche sich entlang einer geradlinigen Flugbahn auf einer Höhe über einer Referenzfläche bewegen.

Durch solche Radarsysteme werden hauptsächlich zwei Informationen geliefert: die Rückstreuungsintensität und die Phasenlage. Hierbei hängt die Intensität der zurückgestreuten Radarstrahlung von den physischen Merkmalen der Objektoberflächen, z. B. der Rauheit und der Geometrie, und den Materialeigenschaften, wie Wassergehalt und dielektrische Eigenschaften, ab. Durch die Intensitätsmerkmale eines Objektes kann z. B. die Rückstreuungsstabilität (sowohl in Zeit als auch in Raum) beurteilt werden. Hinzu kommt die Phasenlage, welche Rückschlüsse auf die Länge der Ausbreitungswege der Radarsignale ermöglicht. Für die Erfassung von Bodenbewegungen ist die Information der ausbreitungswegabhängigen Phasenlage die entscheidende Größe. Auf die Nutzung von Phaseninformationen bei den radarinterferometrischen Auswertungen wird in Kapitel 3.2.1 näher eingegangen.

Klassischerweise wird die Radarfernerkundung der optischen Fernerkundung gegenübergestellt und im Hinblick auf die Einflüsse der Atmosphäre als vorteilhaft bewertet. Im Vergleich zu optischen Fernerkundungssystemen, welche üblicherweise das reflektierte Sonnenlicht als Strahlungsquelle nutzen, sind Radarsysteme durch die eigene Strahlungsquelle von der Tageszeit der Aufnahme unabhängig. Hinzu kommt, dass die Radarfernerkundung eine relativ größere Wellenlänge (Mikrowellenbereich) nutzt, welche die Atmosphäre durchdringen kann. Dadurch sind Radaraufnahmen auch bei einer vorhandenen Bewölkung durchführbar. Jedoch führt die Änderungen der Refraktion in der Atmosphäre, z. B. durch den Wechsel des Ausbreitungsmedium für die Radarstrahlung, zur Änderung des Ausbreitungsweges der Wellen, und dadurch die Änderung der Phasenlage (Schäfer, 2012). Hierbei ist deshalb zu beachten, dass eine vollständige Befreiung von Einflüssen durch die Atmosphäre (z. B. tageszeitabhängige Wetterlage) bei einer radarinterferometrischen Auswertung in den meisten Fällen nicht zu erwarten ist. Einflüsse durch die Aufnahmetageszeit im Zusammenhang mit der Atmosphäre können sich in Ergebnissen der radarinterferometrischen Messung bei der Erfassung von Bodenbewegungen in Form von Störfaktoren zeigen (Schäfer, 2012).

3.1.2 Aufnahmegeometrie des SAR-Systems

Ein abbildendes Radarsystem, z. B. montiert an Flugzeugen oder Satelliten, bewegt sich auf einer gradlinigen Flugbahn während die Radarwellen gesendet und

empfangen werden. Die Antennen sind dabei seitwärts nach unten auf die Erdoberfläche gerichtet, womit ein Teil der kontinuierlich fortsetzenden Aufnahme-streife (swath) beleuchtet wird („antenna footprint“) (Woodhouse, 2005). Die Aufnahmegeometrie ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

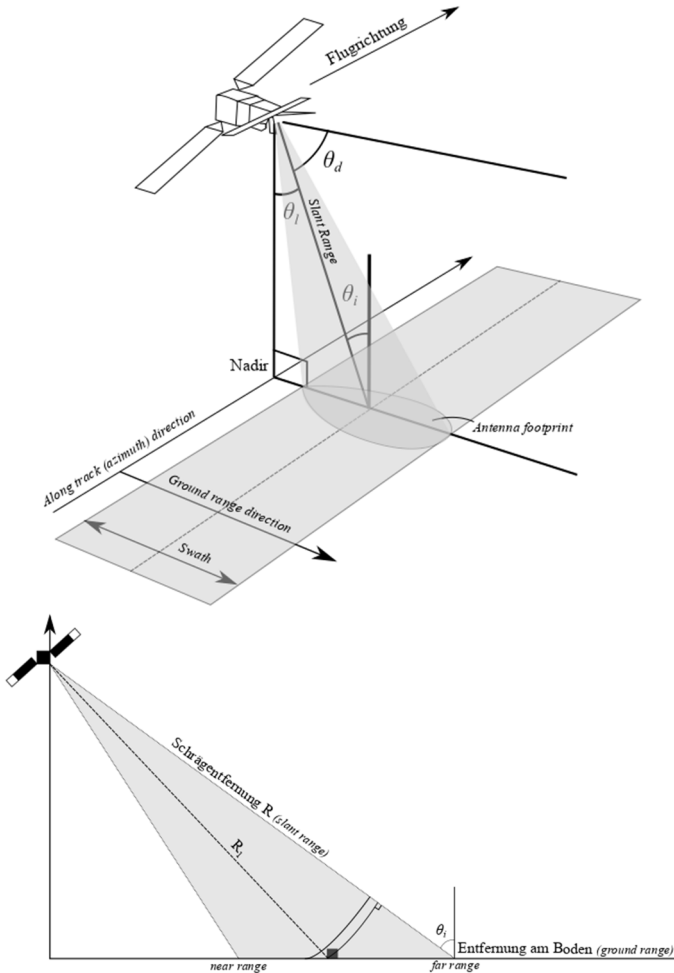


Abbildung 4: Schematische Repräsentation eines seitlich blickenden abbildenden Radarsystems mit der Darstellung des Aufnahmebereiches (antenna footprint) einer Aufnahmestreife (swath) nach Woodhouse (2005) u. Walter (2012)

Das Radarsystem sendet eine Reihe von kurzen Mikrowellenimpulsen (mit einer Länge von τ_p) aus. Ein Radarpuls bewegt sich dann in der Blicklinie des Sensors, welche unter den englischen Begriffen „slant range“ oder „line of sight (LoS)“

bezeichnet wird, mit der Lichtgeschwindigkeit c . Die weiteren Schlüsselvariablen zur Beschreibung der Aufnahmegeometrie im Hinblick auf die Blicklinie sind hierbei die Winkelangaben in Abbildung 4.

Der Blickwinkel (look angle), θ_l , ist der Winkel zwischen dem Nadir und der Blicklinie (LoS) des Sensors, wobei sich der Depressionswinkel (depression angle), θ_d , auf die lokale Horizontale des Radarsystems bezieht. Der Einfallswinkel (incidence angle), θ_i , bezeichnet den Winkel zwischen der Blicklinie und der Normalen zu einer vordefinierten Referenzfläche. Diese Referenzfläche kann ein lokales Datum oder eine ortsspezifische Oberfläche sein. In Betracht kommt außerdem der „lokale“ Einfallswinkel zwischen der LoS und der Normalen der tatsächlichen Erdoberfläche (Topographie).

Wie bereits in Abbildung 4 zu sehen, bezieht sich das Radarsystem in dieser Arbeit auf satellitengestützte Anwendungen. Die Flug- oder Umlaufbahn um den Zentralkörper „Erde“, auch als Satellitenorbit (eng. orbit) bezeichnet, resultiert in verschiedene Orbitkonfigurationen.

Es gilt für viele Radarsensoren die polarnahe Umlaufbahn, mit einer Bahnneigung (auch Inklination) um 98° , z. B. Sentinel-1 mit $98,18^\circ$ (European Space Agency - Sentinel-1 Team, 2013), Envisat ASAR mit $98,55^\circ$ (European Space Agency, 2019a), TerraSAR-X mit $97,44^\circ$ (Airbus Defence and Space, 2015) usw. Hierbei bezeichnet die Bahnneigung eines Satelliten den Winkel zwischen der Bahnebene und dem Äquator. Abbildung 5 stellt diesen geometrischen Zusammenhang schematisch dar.

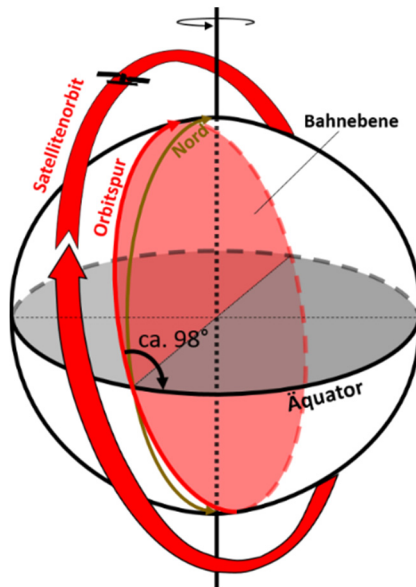


Abbildung 5: Darstellung der Bahnneigung eines inklinierten polarnahen Satellitenorbits und dazugehörigen Orbitspur auf der Erdoberfläche

Somit verläuft die polarnahe Umlaufbahn in quasi Nord-Süd-Richtung (siehe Abbildung 6). Ein solcher Radarsatellit fliegt nahezu von Nord nach Süd (absteigend = descending) über eine Seite der Erde, dann auf der entgegengesetzten Seite von Süd nach Nord (aufsteigend = ascending). In dieser Arbeit werden die englischen Begriffe für die Flugrichtungen (ascending und descending) aufgrund deren weit verbreiteten internationalen Gebrauch verwendet.

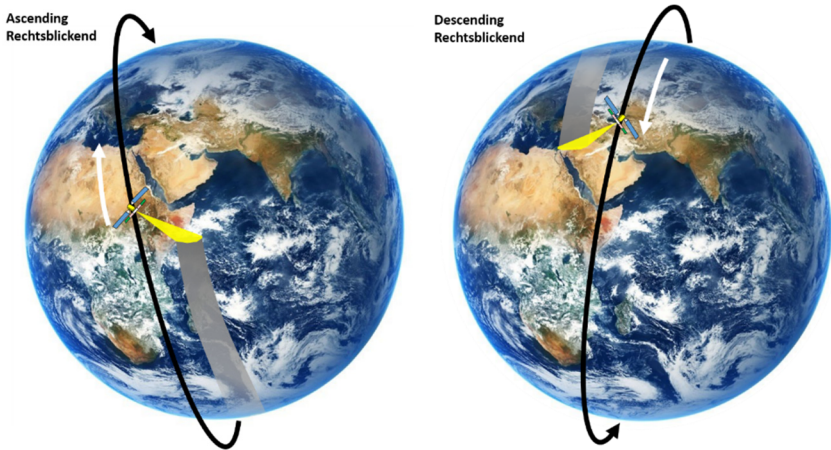


Abbildung 6: Vergleich der Ascending und Descending Aufnahme eines rechtsblickenden Satelliten mit polarnaher Umlaufbahn in Süd-Nord-, bzw. Nord-Süd-Richtung

In Zusammenhang mit der Selbstdrehung der Erde setzen sich die Aufnahmestreifen nicht nur in der Flugrichtung (Nord-Süd-Richtung) fort, sondern auch zeitversetzt in der Ost-West-Richtung. Ein Gebiet kann somit zeitlich versetzt von der Ascending- als auch der Descending-Flugrichtung aufgenommen werden. Die Aufnahmestreifen werden üblicherweise je nach deren Charakteristiken der Konstellation (Antennen- u. Flugausrichtung), auch in Bezug auf die Erdoberfläche (Aufnahmeposition), durch eine Tracknummer gekennzeichnet. Der Begriff des Tracks wird im Laufe dieses Kapitels und dieser Arbeit im Hinblick auf die Differenzierung mehrerer Aufnahmekonstellationen eingesetzt.

Da das Betriebsprinzip der meisten Radarsysteme darin besteht, die Zielentfernung aus einer gemessenen Echozeitverzögerung abzuschätzen, gehört die Auflösung, mit der diese Entfernung gemessen werden kann, zu einer der wichtigsten Qualitätsindikatoren eines Radarsystems. Aus dieser Range-Richtung ergibt sich eine Dimension des Radarbildes. Die Range-Auflösung eines Radarsystems ist im allgemeinen Verständnis als die Trennbarkeit von zwei idealen Punktoobjekten durch die zurückgestreuten Pulse in der Blickrichtung definiert. Hierbei ist es unter dem englischen Begriff „slant range resolution“ zu verstehen, welcher auf Deutsch auch als Schrägentfernungsauflösung (Walter, 2012) bezeichnet werden kann. Stehen zwei rückstreuende Objekte so nah zueinander, so dass die von ihnen zurückgestreuten Pulse zeitlich überlappend empfangen werden, können die zwei Punktoobjekte nicht auseinandergehalten werden. Daher hängt die Range-Auflösung von der Dauer eines vom Radarsystem ausgesendeten Pulses τ_p ab. Der mindeste Abstandunterschied von zwei trennbaren Punktoobjekten

zum Sensor, also die Range-Auflösung ρ_r , ergibt sich somit durch die Formel (Walter, 2012):

$$\rho_r = \frac{c \cdot \tau_p}{2} \quad (3-1)$$

Um gleichzeitig die hohe Leistung und Auflösung zu erhalten, verwenden vielen Radarsysteme spezielle frequenz-modulierte Pulse, auch „chirped pulse“ genannt. Durch die Modulation der Trägersignale über eine kleine Bandbreite B_p von Frequenzen werden die ausgesendeten Signale kodiert, so dass die Trennbarkeit von rückgestreuten Signalen durch die Kodierung trotz der Überlappung deutlich erhöht wird. Durch den sog. Range-Kompression-Prozess wird die Korrelation zwischen den empfangenen und originalen Chirp-Signalen verbessert (Woodhouse, 2005). Die effektive Pulslänge τ_e , die durch die Bandbreite B_p mit $\tau_e = \frac{1}{B_p}$ definiert ist, gibt somit die Range-Auflösung endgültig vor (Woodhouse, 2005):

$$\rho_r = \frac{c \cdot \tau_e}{2} = \frac{c}{2 \cdot B_p} \quad (3-2)$$

Diese Angabe der Range-Auflösung bezieht sich direkt auf der Blickrichtung des Radarsensors. Im Hinblick auf Anwendungen von Radarinformationen im Bereich der Bodenbewegungserfassung wird zusätzlich von der Bodenauflösung ρ_g (auf Englisch „ground range resolution“) geredet, die unter der Projektion der Range-Auflösung ρ_r auf eine horizontale Bildebene verstanden werden kann (siehe Abbildung 7). Durch die folgende Gleichung kann die Bodenauflösung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel berechnet werden:

$$\rho_g = \frac{\rho_r}{\sin \theta_i} \quad (3-3)$$

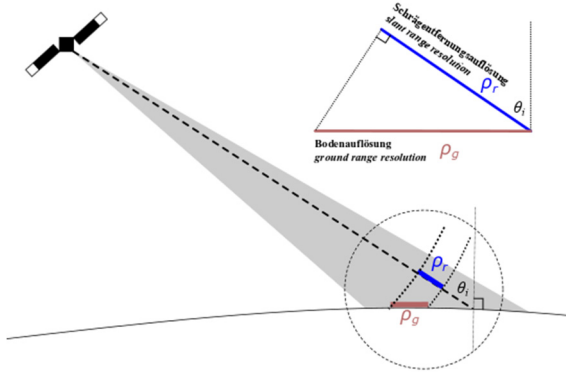


Abbildung 7: Projektion der Schrägentfernungsauflösung ρ_r zur Bestimmung der Bodenauflösung ρ_g

Berücksichtigt man den durch die Geländeneigung bestimmten lokalen Einfallswinkel, kann die Range-Bodenauflösung noch weiter differenziert werden. Für die detaillierte Beschreibung zur Umrechnung der Bodenauflösung siehe auch Walter (2012).

Die zweite Dimension der Radargeometrie wird durch die Flugrichtung des Sensors (auch eng. along track direction) gegeben. Diese Richtung wird auch als Azimut-Richtung (eng. azimuth direction) bezeichnet. Bei einem Radarsystem mit realer Apertur (real aperture radar, RAR) wird die Azimut-Auflösung in Abhängigkeit von den antenneneigenschaften-bedingten Öffnungswinkel in der Flugrichtung bzw. Antennenlänge L_a , und der Abstand zum Rückstreuer R , mit folgender Gleichung berechnet (Walter, 2012):

$$\rho_a^{RAR} = \frac{\lambda}{L_a} \cdot R \quad (3-4)$$

Aus der Formel ist zu erkennen, dass eine große Antennenlänge erforderlich ist, um eine hohe Azimut-Auflösung zu erreichen. Bei einem satellitengestützten Radarsensor kann die Flughöhe über 800 km betragen, dementsprechend der Abstand zum Rückstreuer R bereits über 900 km. Für einen Radarsensor mit C-Band (4 – 8 GHz), welcher eine Azimut-Auflösung von 20 m erzielen soll, müsste die Länge der Antenne über 2500 m erreichen. Dies ist technisch nicht umzusetzen.

Zwecks der Verbesserung der Azimut-Auflösung wurde das SAR-Radarsystem entwickelt, dessen Daten in dieser Arbeit verwendet werden. Bei der erhöhten Pulswiederholungsrate der während des Weiterflugs ausgesendeten, kohärenten Impulse kann die Phasenhistorie eines Rückstreuers mithilfe der Interpretation

der Dopplerfrequenz quasi kontinuierlich aufgenommen werden, womit eine längere synthetische Antennenlänge in der Azimut-Richtung generiert wird und die Azimut-Auflösung auf

$$\rho_a^{SAR} = \frac{L_a}{2} \quad (3-5)$$

verbessert wird (Walter, 2012).

3.2 Radarinterferometrie als Messverfahren für die Erfassung von Bodenbewegungen

3.2.1 *DInSAR*

Wie im vorherigen Kapitel bereits erläutert wurde, senden bei einem aktiven Radarsystem Radarsatelliten Mikrowellenstrahlung zur Erdoberfläche aus und messen von den zurückgestreuten Signalen sowohl die Rückstreuintensitäten als auch die Phasenlage. Dabei wird der Schwingungszustand des eintreffenden Signals mit der Phasenlage ϕ im Wertebereich von $-\pi$ bis $+\pi$ erfasst, welche proportional zum Signalweg ist und als Schlüsselkenngröße zur Erfassung von Abstandsveränderungen zwischen Objekt und Sensor benötigt wird.

Die SAR-Interferometrie (InSAR) ist ein Messverfahren, welches die empfangenen Phaseninformationen verwendet, um aus jeweils zwei SAR-Bildern (Szenen) Phasendifferenzenbilder, die sog. Interferogramme, zu berechnen, um die Entfernungsinformation von Objekten zu erfassen. Die Phasendifferenzen resultieren zum einen aus der Aufnahmegeometrie (Schrägsicht $\varphi_{Schrägsicht}$) und den leicht unterschiedlichen Orbit-Positionen des Satelliten zu den Aufnahmezeitpunkten, zum anderen aus den Höhen der Gelände- und Objektoberfläche (Topographie φ_{topo}) sowie deren Veränderung (Deformation φ_{Defo}). Ferner werden zusätzliche Signalverzögerungen und entsprechende Phasendifferenzanteile durch atmosphärische Effekte ausgelöst (φ_{Atm}). Der restliche Anteil, das Messrauschen, wird durch den Term $\varphi_{Rauschen}$ beschrieben. Somit kann die Zusammensetzung eines Interferogrammes mit den erwähnten Phasenanteilen wie in Formel (3-6) beschrieben werden (Walter, 2012).

$$n \cdot 2\pi + \varphi_{InSAR} = \varphi_{Schrägsicht} + \varphi_{topo} + \varphi_{Defo} + \varphi_{Atm} + \varphi_{Rauschen} \quad (n \in \mathbb{N}) \quad (3-6)$$

Dabei ist es zu beachten, dass die Phasenwerte in einem Interferogramm noch von Phasenmehrdeutigkeit im Wertebereich von π bis $-\pi$ begrenzt sind, welche noch durch Verfahren der Phasenabwicklung zu ermitteln ist (siehe Kapitel 3.2.3).

Zur Erfassung von deformationsbedingten Abstandveränderungen der Objekte wird das DInSAR-Verfahren verwendet. Basierend auf dem InSAR-Verfahren benutzt die DInSAR die Phaseninformation von mindestens zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten über demselben Gebiet aufgenommenen SAR-Datensätzen, z. B. Single Look Complex (SLC). Um darüber hinaus den deformationsbedingten Phasenanteil zu ermitteln, müssen die anderen Phasenanteile aus dem Interferogramm herausgerechnet werden.

Hierbei wird eine abstrakte Erklärung über das Messprinzip des InSAR- und DInSAR-Verfahrens nach Crosetto et al. (2016) in den folgenden Paragraphen dargelegt. Die Aufnahmesituation bzgl. eines Punktes P , der sich im Zeitraum zwischen zwei Aufnahmen M (Masterszene) und S (Slaveszene) von der Position P_0 zur Position P_1 bewegt hat, wird in Abbildung 8 dargestellt.

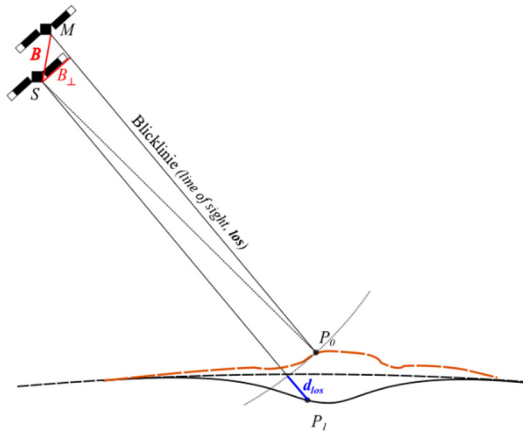


Abbildung 8: Zur Erläuterung des InSAR- und DInSAR-Verfahrens, basierend auf dem Vergleich einer Master- und einer Slaveaufnahme

Für ein einzelnes Pixel über dem Punkt P an der Position P_0 auf der Erdoberfläche nahm der Radarsensor aus der Satellitenposition M zuerst einen Phasenwert ϕ_M auf (Crosetto, et al., 2016):

$$\phi_M = \phi_{Geom-M} + \phi_{Streu-M} = \frac{2 \cdot 2\pi \cdot MP_0}{\lambda} + \phi_{Streu-M} \quad (3-7)$$

wobei MP_0 die Distanz zwischen dem Sensor und dem aufgenommenen Objekt ist; $\phi_{Streu-M}$ ist die Phasenverschiebung, die durch die Wechselwirkung zwischen den Mikrowellen und dem Zielobjekt resultiert; λ repräsentiert die Radarwellenlänge, und der Faktor 2 ergibt sich durch die verdoppelte Weglänge der Radarstrahlung (Sensor - Objekt - Sensor).

Wenn der Punkt P bis zur zweiten Aufnahme S keine Bewegung erfahren hat, beinhaltet die zweite Aufnahme des Radarsensors aus der Satellitenposition S dann eine Phase ϕ_S über demselben Punkt P an der Position P_0 (Crosetto, et al., 2016):

$$\phi_S = \phi_{Geom-S} + \phi_{Streu-S} = \frac{4 \cdot \pi \cdot SP_0}{\lambda} + \phi_{Streu-S} \quad (3-8)$$

Das InSAR-Verfahren nutzt die Phasendifferenzen $\phi_S - \phi_M$ (Crosetto, et al., 2016):

$$\varphi_{InSAR} = \phi_S - \phi_M = \frac{SP_0 - MP_0}{\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}} + \phi_{Streu-S} - \phi_{Streu-M} \quad (3-9)$$

Diese Phasendifferenz ist die sog. interferometrische Phase und bezieht sich auf den Unterschied der Distanzen $SP_0 - MP_0$. Für den Fall, dass der Punkt P keine Bewegung erfahren hat, ist die in der Gleichung (3-9) beschriebene interferometrische Phase nur von dem aufnahmegeometrie-bedingten Phasenanteil und der Topographie abhängig. Aus diesen Informationen können z. B. digitale Höhenmodelle berechnet werden. Beim DInSAR-Verfahren, welches zur Erfassung von Bodenbewegungen dient, sind diese Phasenkomponenten herauszurechnen. Die ausführliche Beschreibung zur Ableitung dieser Phasenkomponenten findet sich z. B. in Walter (2012).

Für den Fall, dass sich der Punkt P vor der zweiten Aufnahme von der Position P_0 zur Position P_1 bewegt hat, ermittelte die erste Aufnahme aus der Satellitenposition M weiterhin für das Rückstreuzentrum P_0 einen Phasenwert ϕ_M , während die zweite Aufnahme aus der Satellitenposition S mit einem Phasenwert ϕ_{S,P_1} für die neue Punktposition P_1 enthält. Erneut ergibt sich für ϕ_{S,P_1} die folgende Gleichung:

$$\phi_{S,P_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot SP_1}{\lambda} + \phi_{Streu-S} \quad (3-10)$$

Die interferometrische Phase ergibt sich demnach zu:

$$\varphi_{InSAR} = \phi_{S,P_1} - \phi_M = \frac{SP_1 - MP_0}{\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}} + \phi_{Streu-S} - \phi_{Streu-M} \quad (3-11)$$

Hinsichtlich der Gleichung (3-9) kann die Gleichung (3-11) mit der Addition und dann Subtraktion von einem Term $SP_0/(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi})$ mathematisch in Form der Gleichung (3-12) umgeschrieben werden.

$$\varphi_{InSAR} = \phi_{S,P_1} - \phi_M = \frac{SP_1 - SP_0}{\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}} + \frac{SP_0 - MP_0}{\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}} + \phi_{Streu-S} - \phi_{Streu-M} \quad (3-12)$$

Hierbei entspricht der erste Term in der Gleichung (3-12) dem durch die Positionsveränderung des Punktes P auf der Blicklinie (vgl. Abbildung 8, LoS-Bewegung $\|d_{LoS}\| = \|SP_1 - SP_0\|$) verursachten Phasenanteil φ_{Defo} , welcher auch der gesuchte Phasenanteil beim DInSAR-Verfahren ist. Der zweite Term in der Gleichung (3-12) entspricht den topographischen und aufnahmegeometriebedingten Phasenanteilen, welche in Bezug auf Gleichung (3-9) bereits erklärt wurden. Bei der Durchführung des DInSAR-Verfahrens können diese Phasenanteile mithilfe z. B. eines digitalen Höhenmodells (DHM) simuliert und somit aus den interferometrischen Phasen eliminiert werden. Die LoS-Bewegung lässt sich aus dem deformationsbedingten Phasenanteil wie folgt berechnen:

$$d_{LoS} = -(SP_1 - SP_0) = -\varphi_{Defo} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \quad (3-13)$$

Die DInSAR-Phasen setzen sich jedoch aus verschiedenen Anteilen zusammen, die sich durch die nachfolgende Gleichung beschreiben lassen,

$$\begin{aligned} \varphi_{DInSAR} &= \varphi_{InSAR} - \varphi_{Topo-simu} \\ &= \varphi_{Defo} + \varphi_{Topo-res} + (\phi_{Atm_S} - \phi_{Atm_M}) + (\phi_{Orb_S} \\ &\quad - \phi_{Orb_M}) + \varphi_{Rauschen} + 2 \cdot k \cdot \pi \end{aligned} \quad (3-14)$$

in der $\varphi_{Topo-res}$ dem Residuum des topographischen Phasenanteils nach dem Abzug der aus Höheninformationen simulierten topographischen Phase $\varphi_{Topo-simu}$ entspricht; ϕ_{Atm} repräsentiert die Phasenverschiebung, die infolge der zu den verschiedenen Zeitpunkten der beiden Aufnahmen herrschenden atmosphärischen Einflüsse entstanden ist; ϕ_{Orb} ist der durch ungenaue und / oder fehlerhafte Orbitdaten verursachte Phasenverschiebung; $\varphi_{Rauschen}$ stellt das Phasenrauschen dar. Der letzte Term repräsentiert die Phasenmehrdeutigkeit der DInSAR-Phasen.

Diese obengenannten Residuen verbleiben noch als Fehlereinflüsse in der durch DInSAR abgeleiteten LoS-Bewegung. Zur Bestimmung des deformationsbedingten Phasenanteils müssen die obengenannten Fehlereinflüsse durch verschiedene Ansätze aus den DInSAR-Phasen minimiert werden. Um das Residuums des topographischen Phasenanteils möglichst klein zu halten, sind aktuelle (bezogen auf die Satellitenaufnahmezeitpunkte) und höher auflösende, sowie der Höhe des Rückstreucentrums an den Objekten entsprechende Höhendaten zu verwenden (Walter, 2012) (Busch, et al., 2018). Durch die Verwendung von präzisen Orbitinformationen kann bei den meisten modernen Sensoren davon ausgegangen werden, dass die daraus resultierenden Fehlereinflüsse vernachlässigbar sind. Atmosphärische Einflüsse können nur bedingt aus den differentiellen Phasen eliminiert werden und führen somit ebenfalls zu Fehlern bei der Ableitung der Deformationen.

Die generellen Einschränkungen des DInSAR-Verfahrens können weiterhin mit den folgenden drei Aspekten zusammengefasst werden. Erstens beeinflusst die zeitliche und geometrische Dekorrelation den Term $\varphi_{Rauschen}$ (Hanssen, 2001). Die zeitliche Dekorrelation wird überwiegend in Vegetationsgebieten und Bereichen auftreten, in denen sich die elektromagnetischen Profile und / oder die Position der Rückstreuer innerhalb einer Auflösungszelle verändern. In solchen Gebieten wird keine gute Kohärenz im Bildpaar entstehen, was somit zu einem Informationsverlust in der Fläche führt. Die geometrische Dekorrelation begrenzt bzgl. der räumlichen Basislinien die Anzahl der nutzbaren, gut kohärenten Bildpaare und führt somit zum Informationsverlust in der Zeit. Zweitens kann die räumliche, zweidimensionale Phasenabwicklung bei einem stark dekorrelierten Gebiet kaum funktionieren (Ghiglia & Pritt, 1998), so dass die Bewegungen in solchen Gebieten entweder nicht berechnet werden können, oder sogar falsch berechnet werden. Drittens kann der atmosphärisch-bedingte Phasenanteil bei der Betrachtung eines einzelnen differentiellen Interferogramms zu einem großen Fehlereinfluss führen. Die resultierenden Effekte können sich großräumig in Form von Trends der Signalwegveränderung darstellen, oder aber kleinräumig einem deformationsartigen Phasenverlauf entsprechen.

3.2.2 PSI

Die obengenannten Einschränkungen des DInSAR-Verfahrens reduzieren mitunter deutlich die Aussagekraft seiner Ergebnisse. Um das vorhandene Potential der DInSAR-Technik für die Erfassung von Bodenbewegungen zu nutzen, zielen Weiterentwicklungen der DInSAR-Technik ab weitestgehend auf die Trennung des Bewegungsphasenanteils φ_{Defo} von den restlichen Phasenanteilen in der Gleichung (3-14). Einer der hierzu entwickelten Ideen führt zur Detektion und Analyse von Pixeln, die nur wenig vom Rauschen beeinflusst sind.

Das Verfahren „Persistent Scatterer Interferometrie (Ferretti, et al., 2001)“ repräsentiert einen Ansatz, bei dem die interferometrischen Phasen an realen Objekten, deren Rückstreuungseigenschaften sich über eine größere Anzahl aufeinanderfolgender Aufnahmen der Radarsatelliten als signifikant und stabil erwiesen haben, „punkthaft“ erfasst werden. PS-Punkte repräsentieren in der Realität meist anthropogene Objekte mit langzeitstabilen Rückstreueigenschaften, wie z. B. Hausdächer.

Seit der ersten Veröffentlichung zu diesem Verfahren in Ferretti et al. (1999) wurden verschiedene Ansätze weiterentwickelt. Eine detaillierte Dokumentation über die Entwicklung der PSI-Verfahren findet sich in Crosetto, et al. (2016). Die Definition von „Objekten mit langzeitstabilen Rückstreueigenschaften“, die sog.

Persistent Scatterer (PS), kann sich je nach den angewendeten Ansätzen bzw. deren Ausschlusskriterien von PS-Punkten variieren. Ursprünglich wurden nur die langzeitkohärenten Rücksteuer betrachtet, welche durch einen temporalen Dispersitätsindex der Amplitude und die Phasenstabilität mittels der Zeitreihenanalyse der Phasenwerte ausgesucht wurden (Ferretti, et al., 2001). Damit können zuverlässige Höheninformationen und Bewegungen auch in Bereichen mit niedriger Kohärenz bezogen auf einzelne Pixel abgeleitet werden (Ferretti, et al., 1999).

In dieser Arbeit werden die PSI-Auswertungen mittels der GAMMA Software (Version vom 13.06.2019) der Firma GAMMA Remote Sensing AG (Schweiz) unter Anwendung des Verfahrens „Interferometric Point Target Analysis (IPTA)“ durchgeführt, bei der die Rückstreuer mit einer niedrigen spektralen Diversität in einer einzelnen Szene (Werner, et al., 2003) und / oder temporale Variabilität der Rückstreuung als PS-Kandidaten zum Beginn einer Auswertung detektiert werden. An diesen PS-Kandidaten werden die abgewickelten Phasenzeitreihen der LoS-Bewegung und die Höhenkorrektur an jedem PS-Punkt durch eine zweidimensionale Regressionsanalyse des differentiellen interferometrischen Phasenwertes zu den entsprechenden zeitlichen und räumlichen Basislinien und hauptsächlich die zeitliche Phasenabwicklung (wegen der Phasenmehrdeutigkeiten) ermittelt. Die PS-Kandidaten mit hoher Standardabweichung bei der Regression werden wegen ihrer niedrigen Qualität von der endgültigen PS-Punktliste ausgeschlossen.

Die allgemeine mathematische Ableitung für die Berechnung der LoS-Bewegung und der Höhenkorrektur mittels des PSI-Verfahrens lässt sich wie folgt darstellen. Ein Stapel von $n + 1$ SAR-Bildern und ein digitales Höhenmodell werden zunächst auf eine gemeinsame Masterszene koregistriert. Danach werden N differentielle Interferogramme zwischen jeder Szene und der Masterszene erstellt. Nach der Korrektur der topographischen und orbitbedingten Phasen mithilfe des digitalen Höhenmodells lassen sich die Residuen eines differentiellen Interferogramms i wie folgt darstellen (Ferretti, et al., 2001):

$$\varphi_{DInSAR,i} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_i + \varphi_{Topo-res,i} + \varphi_{atm,i} + \varphi_{Rauschen,i} + 2 \cdot k \cdot \pi, \quad (3-15)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

Hierbei ist λ die Wellenlänge des Radarsystems ist; $\Delta\varphi_{atm,i}$ ist der atmosphärische Phasenanteil; $\Delta\varphi_{Rauschen,i}$ ist das Rauschen infolge der Dekorrelation und $\varphi_{Topo-res,i}$ einen möglichen Fehler im DHM (in Abhängigkeit zur rechtwinkligen räumlichen Basislinie $B_{\perp,i}$ jeder Aufnahme), während Δr_i der LoS-Bewegung entspricht.

Durch eine Zeitreihenanalyse an den detektierten PS-Punkten können die LoS-Bewegungen ermittelt werden. Unter Annahme einer weitestgehend konstanten Bewegungsgeschwindigkeit (und somit nicht für ein kurzzeitig sich „stark“ veränderndes Bewegungsverhalten) kann der erste Term in Formel (3-16) wie folgt beschrieben werden (Ferretti, et al., 2001):

$$\frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_i = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot v_{LoS} \cdot \Delta T_i = C_{v,i} \cdot v_{LoS}, i = 1, 2, \dots, N \quad (3-16)$$

Dabei stellt v_{LoS} die unbekannte Bewegungsgeschwindigkeit in der LoS-Richtung und ΔT_i die zeitliche Basislinie der jeweiligen Szene zur Masterszene dar. Da die N differentiellen Interferogramme von demselben Gebiet unterschiedliche zeitliche und räumliche Basislinien besitzen, kann ein lineares Gleichungssystem für jedes Pixel aufgestellt werden (Ferretti, et al., 2001):

$$\varphi_{DInSAR,i} = C_{v,i} \cdot v_{LoS} + C_{h,i} \cdot \varepsilon_h, i = 1, 2, \dots, N \quad (3-17)$$

wobei ε_h der Fehler des DHMs und $C_{h,i}$ proportional zu $B_{\perp,i}$ ist, während $C_{h,i}$ proportional zu ΔT_i ist. Um die atmosphärischen Einflüsse zu reduzieren und die Fehler der Basislinien zu beseitigen, können die Phasenkomponenten mit niedrigen Frequenzen je nach den verwendeten Ansätzen im Vorfeld und / oder im Verlauf der iterativen Regressionsberechnungen korrigiert werden. Als Ergebnisse werden die Bewegungsgeschwindigkeiten und eine korrigierte Höheninformation erhalten.

3.2.3 Fehlereinflüsse bei der PSI-Auswertung

3.2.3.1 Atmosphärische Einflüsse

Die atmosphärischen Störeinflüsse können auch bei dem PSI-Auswerteverfahren zu Fehlern in den abgeleiteten LoS-Bewegungen führen. Meistens sind solche Einflüsse durch statistische Analysen und Modelle zu reduzieren. Teilweise lassen sich auch Hinweise auf mögliche atmosphärische Störeinflüsse durch Vergleiche von Zeitreihen benachbarter PS-Punkte finden. Eine vollständige Eliminierung des atmosphärischen Phasenanteils ist kaum zu erwarten. Im Rahmen dieser Arbeit werden atmosphärisch stark beeinträchtigten Szenen aus dem verwendeten Datenstapel entfernt.

3.2.3.2 Eindimensionale, zeitliche Phasenabwicklung

Für jeden PS-Punkt existiert eine zeitliche Abfolge von Phasenwerten. Da die gemessenen Phasen in Radaraufnahmen mehrdeutig sind, d. h. Modulo 2π , besitzen auch die interferometrischen Phasen Werte zwischen $-\pi$ und $+\pi$. Beim

Phase Unwrapping werden diese Mehrdeutigkeiten aufgelöst, um einen kontinuierlichen Phasenverlauf zu erhalten. Die zeitliche Abwicklung der Phasenwerte jedes einzelnen PS-Punktes erfolgt über eine zweidimensionale Regressionsanalyse basierend auf der linearen Abhängigkeit der Phasenwerte bezüglich der Zeit sowie der räumlichen Basislinien (Abstand der Aufnahmepositionen des Radarsensors im Orbit). Bei der zweidimensionalen Regressionsanalyse werden Ebenen unterschiedlicher Neigung und Ausrichtung in Abhängigkeit der minimal und maximal zu erwartenden Bewegungsgeschwindigkeiten und Höhenfehler der PS-Punkte getestet. Die Regressionsebene mit der jeweils kleinsten Standardabweichung führt zur Lösung der zeitlichen Phasenabwicklung eines PS-Punktes. Die Regression erfolgt mehrfach und teilweise getrennt für jeweils die zeitliche und die basislinienabhängige Dimension. In Abbildung 9 ist beispielhaft das Ergebnis der zeitlichen Regressionsanalyse der Phasen zu sehen. Während die Phasen zunächst noch mehrdeutig sind, wird nach der Phasenabwicklung durch die Neigung der Regressionsgeraden die Bewegungsgeschwindigkeit für einen PS-Punkt in Blickrichtung des Sensors sichtbar.

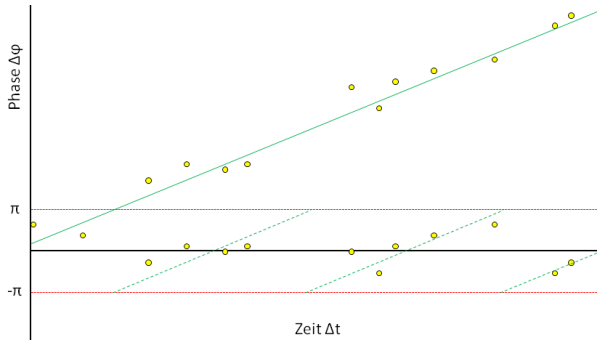


Abbildung 9: Die zeitliche Phasenabwicklung mittels linearer Regression in der Dimension von Phase und Zeit

Damit die zeitliche Phasenabwicklung gelingt, darf die Differenz zeitlich benachbarter Phasenwerte nicht größer als ein halber Phasenzyklus sein. Da ein vollständiger Phasenzyklus (= 1 Fringe) der halben Wellenlänge λ des Sensors entspricht, ergibt sich somit eine maximal erfassbare Bewegung zwischen zwei Zeitpunkten von einer viertel Wellenlänge. Bei der Berechnung von z. B. Höhenänderungen, ergibt sich unter Berücksichtigung des bekannten Einfallswinkels θ_i der auf die Erdoberfläche auftreffenden Radarstrahlung die theoretisch detektierbare Höhenänderung ($\Delta d_{Z,Max}$) zwischen zwei Zeitpunkten bei einer zeitlichen Phasenabwicklung gemäß:

$$\Delta d_{z,Max} = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\cos \theta_i} = \frac{\lambda}{4 \cdot \cos \theta_i} \quad (3-18)$$

Wird diese Detektionsgrenze durch eine reale Höhenänderung überschritten, kann ein Phasenabwicklungsfehler zwischen den zwei Zeitpunkten auftreten. Eine abrupte und schnelle Senkung bei der Phasenabwicklung kann somit zu einem Sprung in der Zeitreihe (Abbildung 10) führen. Diese ist eine typische Erscheinung von Phasenabwicklungsfehlern.

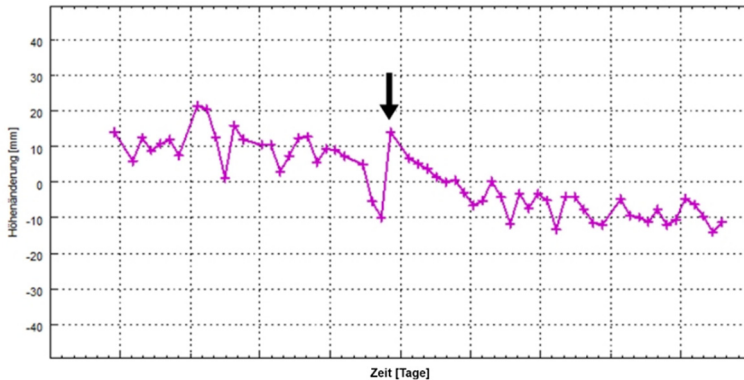


Abbildung 10: Zeit-Höhenänderungsdiagramm mit einem Phasenabwicklungsfehler in etwa der Mitte der Zeitreihe (siehe Pfeil)

Die Ursachen für einen Phasenabwicklungsfehler können sehr unterschiedlich sein. Bei starkem Messrauschen und / oder zeitlichen Ausreißern in den Zeitreihen, beispielsweise hervorgerufen durch starke atmosphärische Einflüsse zu einzelnen Aufnahmezeitpunkten, können Phasenabwicklungsfehler auftreten. Hierdurch kann es beispielsweise zu einer Unterschätzung der eingetretenen Senkungen kommen oder, im Extremfall, eine (unbekannte) reale Senkung als eine Hebung mit einem homogenen Höhenänderungsverhalten ermittelt werden. Abbildung 11 zeigt eine Überschätzung der tatsächlichen Bewegungen, infolge eines erhöhten Messrauschens. Aufgrund der geringeren Standardabweichung der Regressionslösung in Abbildung 11b, ergibt sich nicht nur eine zu große Höhenänderungsrate sondern auch eine mit falschem Vorzeichen im Vergleich zu dem realen Bewegungsverlauf an dieser Stelle (Abbildung 11a).

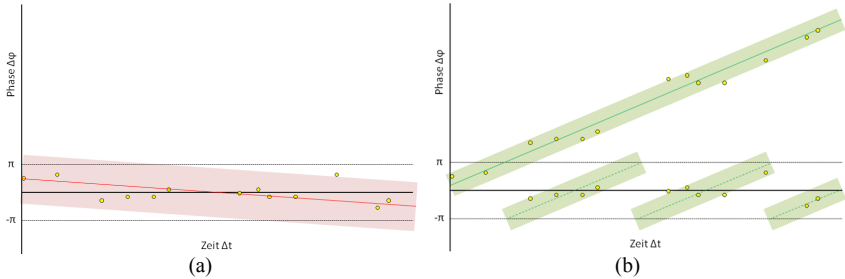


Abbildung 11: Darstellung des (a) tatsächlichen Bewegungsverhaltens eines PS-Punktes im Vergleich zur (b) ausgewählten Regressionslösung, aufgrund der geringeren Standardabweichung der Regressionsgeraden von Phasenwerten

Das Auftreten von Phasenabwicklungsfehlern kann reduziert werden, indem nur PS-Punktkandidaten mit geringeren Standardabweichungen bei der obengenannten Regressionsanalyse weiter prozessiert werden. Besonders im ländlichen Raum führt dies jedoch häufig zu sehr geringen PS-Punktdichten, weil die Standardabweichungen der Phasen dort meist schlechter sind als in bebauten Gebieten. Damit kommt es zu einem Verlust an Informationen über Bodenbewegungen in diesen Bereichen, wenn auf möglichst fehlerfreie Ergebnisse Wert gelegt wird.

Die maximal erfassbare Bewegung eines PS-Punktes in Blickrichtung des Sensors beträgt z. B. bei Envisat ASAR-Daten zwischen zwei Aufnahmen etwa 14 mm. Mit den in dieser Arbeit verwendeten Sentinel-1 Daten können aufgrund der ähnlichen Wellenlänge ebenfalls maximal etwa 14 mm zwischen zwei Aufnahmen erfasst werden. Treten keine Datenlücken in einem Radardatensatz auf, beträgt der zeitliche Abstand zwischen zwei Aufnahmen bei Envisat ASAR 35 Tage und 12 Tage bei Sentinel-1A bzw. 6 Tage zusätzlicher Verwendung von Sentinel-1B-Daten. Aufgrund der relativ kleinen Wellenlänge ist das Messverfahren sensibel für Bewegungen im mm-Bereich. Treten größere Bewegungen als die zuvor für die beiden Sensoren genannten Beträge auf, kommt es zu Mehrdeutigkeiten bei den gemessenen Phasendifferenzen, die wiederum in den meisten Fällen Fehler bei der sog. Phasenabwicklung bewirken, wenn sie bei der PSI-Auswertung mittels des IPTA-Verfahrens nicht aufgrund der großen Abweichung der Phasenwerte zur Regressionsfläche als instabile Rückstreuer klassifiziert werden und aus der Auswertung herausfallen.

3.3 Geometrische Bedeutung der LoS-Bewegung

Wie es bereits in Kapitel 3.2 erwähnt wurde, nutzen die DInSAR- bzw. PSI-Verfahren die Phasendifferenzen an jedem kohärenten Pixel zwischen zwei zeitlich

versetzten Radaraufnahmen (aus allerdings demselben Track) und ermitteln die Abstandsveränderung zwischen dem Sensor und dem Rückstreuer, d. h. in der Blicklinie des Sensor (LoS-Bewegung). In Abbildung 12 wird die Blicklinie am Beispiel einer Ascending-Aufnahme eines rechts blickenden Sensors in einem geographisch orientierten, dreidimensionalen Koordinatensystem dargestellt. Zur Veranschaulichung sind der Blickwinkel θ_i bzw. der Einfallswinkel θ_i und das Azimut der Blickrichtung α_{ald} (azimuth looking direction) angegeben.

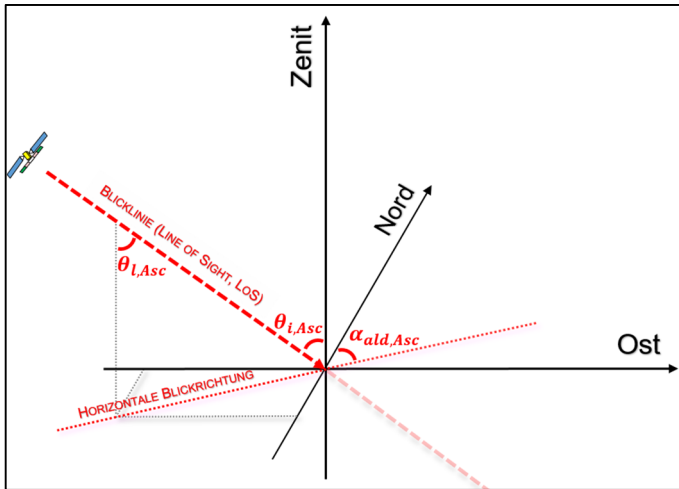


Abbildung 12: Blickrichtung eines satellitengestützten Radarsensors (LoS) am Beispiel einer Ascending-Aufnahme mit einem rechts blickenden Sensor

Wie in Kapitel 3.1.2 bereits erwähnt besitzen aktuelle InSAR-Satelliten meistens eine polarnahe Umlaufbahn. Die Flugrichtung des Satelliten verläuft nahezu Nord-Süd (descending) oder Süd-Nord (ascending) und der Sensor ist quasi senkrecht zur Flugrichtung seitenblickend ausgerichtet, d. h. die horizontale Blickrichtung richtet sich jeweils etwa in Ost-West- oder West-Ost-Richtung aus. Wird ein Gebiet von diesen beiden Blickrichtungen aufgenommen, ergibt sich eine Aufnahmekonstellation, wie sie in Abbildung 13 dargestellt ist.

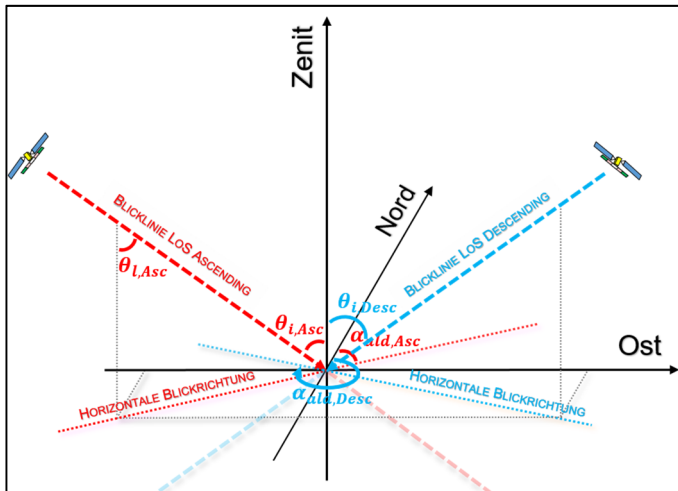


Abbildung 13: Blicklinien der Ascending- und Descending-Aufnahmen in einem dreidimensionalen Koordinatensystem

Diese Aufnahmekonstellation ermöglicht die Ableitung der Bodenbewegungskomponente in Ost-West-Richtung und der Vertikalbewegungskomponente, d. h. die zweidimensionalen Bodenbewegungskomponenten. In Kapitel 4 wird auf die theoretische Herleitung dieses Verfahrens detailliert eingegangen.

3.3.1 Azimut der Blickrichtung

Beim seitenblickenden abbildenden Radar steht das Azimut der Blickrichtung häufig orthogonal zur Flugbahn des Satelliten, der das Radar trägt. Somit ist das Azimut der Entfernungsrichtung (range) ebenfalls rechtwinklig zur Flugrichtung. Ihre Projektion auf die Referenzfläche steht deshalb senkrecht zu der auf die Referenzfläche projizierten Spur der Flugbahn (ground track). Die geometrische Situation ist in Abbildung 14a dargestellt.

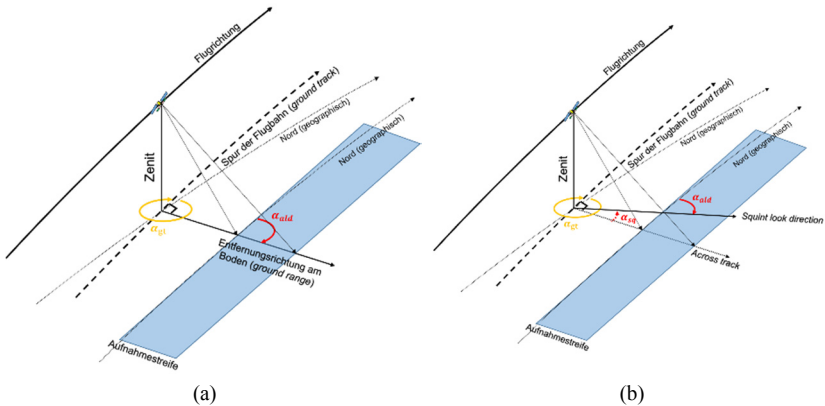


Abbildung 14: Darstellung der geometrischen Zusammenhänge zwischen Satellit und den Aufnahmestreifen mit Fokus auf (a) α_{ald} der azimuthalen Blickrichtung und (b) α_{sq} dem Squintwinkel

Bei einem SAR-Sensor mit einer fixierten Blickrichtung kann das Azimut der Blickrichtung für alle Aufnahmepunkte der Radarszene als identisch betrachtet werden. Der Grund dafür liegt in der SAR-Prozessierung (Woodhouse, 2005). Ist die Blickrichtung orthogonal zur Flugrichtung des Satelliten ausgerichtet, kann das Azimut der Blickrichtung mit Formel (3-19) berechnet werden. Dabei steht α_{gt} für das Azimut der auf der Referenzfläche (z. B. WGS84) projizierten Spur der Flugbahn.

$$\alpha_{ald} = \alpha_{gt} + \frac{\pi}{2} \quad (3-19)$$

Bei einem Sensor, dessen Blickrichtung nicht streng orthogonal zur Flugrichtung steht, muss das Azimut der Blickrichtung unter Berücksichtigung des sog. Squintwinkels α_{sq} berechnet werden (vgl. Abbildung 14b). Bei den in dieser Arbeit verwendeten Daten kommt diese Situation jedoch nicht vor.

Das Azimut der Spur der Umlaufbahn (heading) bezieht sich normalerweise auf Geographisch Nord und ist durch die Ausrichtung der Umlaufbahn des Satelliten bestimmbar. Dabei spielt die Bahnneigung eine der wichtigsten Rollen. Bei einer polarnahen Umlaufbahn, welche die meisten SAR-Sensoren besitzen, beträgt die Bahnneigung etwa 98° (z. B. $98,18^\circ$ bei Sentinel-1). Somit gilt für die meisten SAR-Sensoren, dass das Azimut der Spur der Umlaufbahn bei Ascending ca. -15° und bei Descending -165° beträgt (siehe auch (Fuhrmann & Garthwaite, 2019)).

Hierbei ist zu beachten, dass die Aufnahmestreifen zwar parallel zur Spur der Umlaufbahn, aber durch die große Flughöhe (z. B. ca. 700 km bei Sentinel-1) der

seitenblickenden Sensoren mit großem Abstand zur Umlaufbahnspur auf der Erdoberfläche verlaufen. Bei einer Flughöhe von 700 km und einem Blickwinkel von 30° beträgt dieser Abstand bereits über 400 km. Dies führt letztlich dazu, dass das Azimut der Aufnahmestreifen aufgrund seiner lokalen geographischen Nordrichtung einen anderen Betrag als das Azimut der Umlaufbahnspur aufweist. Daraus resultiert, dass gemäß den zuvor genannten Konditionen das Azimut für Ascending kleiner als 15° und für Descending größer als 165° ist.

Um das Azimut der Blickrichtung zu bestimmen, kann die Berechnung normalerweise anhand der Koordinaten des zu bestimmenden Rückstreuers (L_P, B_P) und der Satellitenbodenposition (L_S, B_S) mit den jeweiligen bekannten geographischen Längen und Breiten nach Formel (3-20) direkt erfolgen (Capderou, 2005).

$$\tan \alpha_{ald} = \frac{\sin(L_P - L_S) \cdot \cos B_S}{\cos B_P \cdot \sin B_S - \sin B_P \cdot \cos B_S \cdot \cos(L_P - L_S)} \quad (3-20)$$

Dafür ist die genaue Bestimmung der Satellitenposition unter Berücksichtigung der SAR-Prozessierung erforderlich. In dieser Arbeit wird diese Form der Analyse aufgrund mangelnder Orbitdaten nicht durchgeführt.

Alternativ ist das Azimut auch über die Eckpunktkoordinaten eines realen Aufnahmestreifens, die normalerweise in den Metadaten enthalten sind, abzuleiten. Sind die Koordinaten von zwei sich auf der Bodenentfernungsrichtung befindenden Punkte P_N (L_{P_N}, B_{P_N}) und P_F (L_{P_F}, B_{P_F}) bekannt (vgl. Abbildung 15), wobei der Punkt P_N näher (Near Range) und der Punkt P_F weiter (Far Range) vom Satelliten entfernt ist, lässt sich das Azimut der Blickrichtung nach Formel (3-21) (McGovern, 2003) bestimmen.

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{ald} &= \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - B_{P_F}\right) \cdot \sin(L_{P_F} - L_{P_N})}{\sin b} \\ b &= \arccos\left[\cos\left(\frac{\pi}{2} - B_{P_F}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - B_{P_N}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} - B_{P_F}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - B_{P_N}\right) \cdot \cos(L_{P_F} - L_{P_N})\right] \end{aligned} \quad (3-21)$$

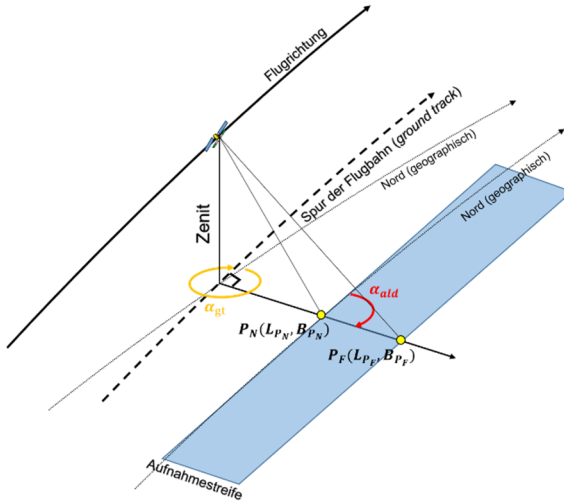


Abbildung 15: Darstellung der Koordinaten von Punkt P_N näher (Near Range) und Punkt P_F weiter (Far Range) am Satelliten mit Hinblick auf die Berechnung vom Azimut der Blickrichtung

Auf der gleichen geographischen Breite vergrößert sich der Unterschied zwischen dem Sensorazimut und dem Azimut der Blickrichtung mit der Abstandszunahme zwischen dem Rückstreuer und der Bodenposition des Sensors zu. Hieraus ergibt sich innerhalb einer Radaraufnahme, selbst mit einer großen Aufnahmestreifenbreite von 250 km (wie z. B. bei Sentinel-1 im Aufnahmemodus „Interferometric Wide (IW)“, ein Unterschied von weniger als 2° .

3.3.2 Einfallswinkel der Blickrichtung

Die weiteren wichtigen Winkelangaben zur Beschreibung der Blicklinie sind Blickwinkel θ_l und Einfallswinkel θ_i (siehe auch Kapitel 3.1.2). Die beiden Winkel sind unter Berücksichtigung der Erdkrümmung nicht identisch (Abbildung 16). Bei der Interpretation der erfassten Bodenbewegungen ist insbesondere der Einfallswinkel von Interesse, weil er die Blicklinie des Sensors an der Position des Rückstreuers auf der Erdoberfläche repräsentiert.

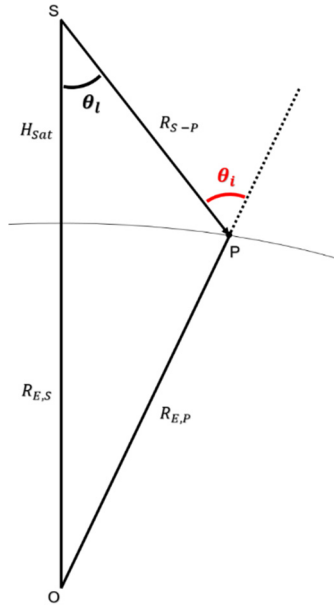


Abbildung 16: Vereinfachte Ableitung des Einfallswinkels bezogen auf die Höhe $h = 0 \text{ m}$ nach (Walter, 2012)

Beim Einfallswinkel kann noch zwischen dem ellipsoidischen Einfallswinkel und dem lokalen Einfallswinkel unterschieden werden. Der ellipsoidische Einfallswinkel bezieht sich auf ein Referenzellipsoid, während sich der lokale Einfallswinkel über das Skalarprodukt des Flächennormalenvektors und des Raumvektors der Blicklinie berechnet (Walter, 2012). Für die durch die Schwerkraft der Erde getriebenen Bodenbewegungen, z. B. Senkungen aufgrund des Zusammenbruchs untertätiger Hohlräume, sollte der Einfallswinkel bzgl. der Lotrichtung verwendet werden, sondern nicht den die Topographie berücksichtigenden lokalen Einfallswinkel. Betrachtet man das Rotationsellipsoid, z. B. Ellipsoid WGS84 (Decker, 1986) u. (Lohmar, 1988), als eine geometrische Annäherung zu dem den Schwerkraftfeld der Erde repräsentierenden Geoid, kann der daraus abgeleitete ellipsoidische Einfallswinkel annäherungsweise als der sich auf die Lotrichtung beziehende Einfallswinkel angenommen werden.

Für die Berechnung des ellipsoidischen Einfallswinkels kann Formel (3-22) eingesetzt werden, wenn der Abstand $R_{E,S}$ zwischen der Bodenposition des Satelliten auf dem mittleren Referenzellipsoid und dem Mittelpunkt der Erde, Abstand $R_{E,P}$ zwischen dem Punkt P auf demselben Referenzellipsoid und dem Mittelpunkt der Erde, sowie die Höhe des Satelliten H_{Sat} (über dem Bezugsellipsoid)

und der Abstand R_{S-P} zwischen dem Satelliten und dem Punkt P bekannt sind (Wu, et al., 1981).

$$\sin \theta_i = \frac{(R_{E,S} + H_{Sat}) \cdot \sin \theta_l}{R_{E,P}} \quad (3-22)$$

Die Ableitung von Formel (3-22) erfolgt mit Hilfe der folgenden allgemeinen Beziehung (Sinus-Satz):

$$\frac{\sin \theta_l}{R_{E,P}} = \frac{\sin(\pi - \theta_i)}{R_{E,S} + H_{Sat}} \quad (3-23)$$

Dabei gilt:

$$\sin(\pi - \theta_i) = \sin \theta_i \quad (3-24)$$

$$\theta_l = \cos^{-1} \frac{R_{S-P}^2 + (R_{E,S} + H_{Sat})^2 - R_{E,P}^2}{2 \cdot R_{S-P} \cdot (R_{E,S} + H_{Sat})} \quad (3-25)$$

Der Einfallswinkel θ_l kann sich somit in einem Wertbereich von 0 bis kleiner als $\frac{\pi}{2}$ variieren. Er ist einer der wichtigsten Parameter bei der Berechnung der Bodenbewegungskomponenten. Im Gegensatz zum Azimut der Blickrichtung verändert sich der Einfallswinkel innerhalb einer Radarszene in der Range-Richtung trotz eines fixierten Blickwinkels. Bei einem größeren Blickwinkel und dem daraus resultierten Einfallswinkel vergrößert sich der Unterschied zwischen dem maximalen und dem minimalen ellipsoidischen Einfallswinkel innerhalb einer Szene mit steigender Schrägentfernung besonders stark. Auf diesen Unterschied und seine Folgen bei der Ermittlung der Bodenbewegungen wird in Kapitel 4.3.2.1 anhand sensorspezifischer Beispiele näher eingegangen.

3.3.3 Projektion einer dreidimensionalen Bewegung auf die Blicklinie

Eine reale Punktbewegung, welche durch einen dreidimensionalen Vektor (z. B. \vec{d}) beschrieben werden kann, wird bei einer radarinterferometrischen Messung durch den Vektor \vec{d}_{LoS} repräsentiert, der in Richtung der Blicklinie des Sensors \vec{LoS} weist, und eine Länge $\|\vec{d}\| \cdot \cos \vartheta$ besitzt:

$$\|\vec{d}_{LoS}\| = d_{LoS} = \|\vec{d}\| \cdot \cos \vartheta \quad (3-26)$$

Dabei entspricht ϑ dem Ergänzungswinkel des Winkels zwischen der Bewegungsrichtung und der Blickrichtung des Sensors. In Abbildung 17 wird dieses Prinzip dargestellt.

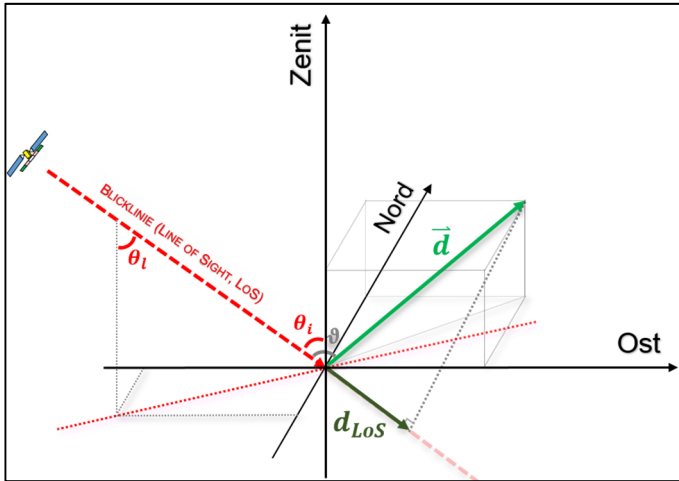


Abbildung 17: Projektion eines Bewegungsvektors auf die Blicklinie des Sensors: direkte Projektionsumrechnung mit bekannten Zwischenwinkel von Bewegungs- und Blickrichtungsvektor

Wenn man die Bewegung \vec{d} in den beiden Bewegungskomponenten: Vertikalbewegung d_z und Horizontalbewegung d_{hor} (Abbildung 18), aufteilt, kann die LoS-Bewegung mit der Angabe des Azimuts der Bewegung $\alpha_{\vec{d}}$ nach Formel (3-27) berechnet werden.

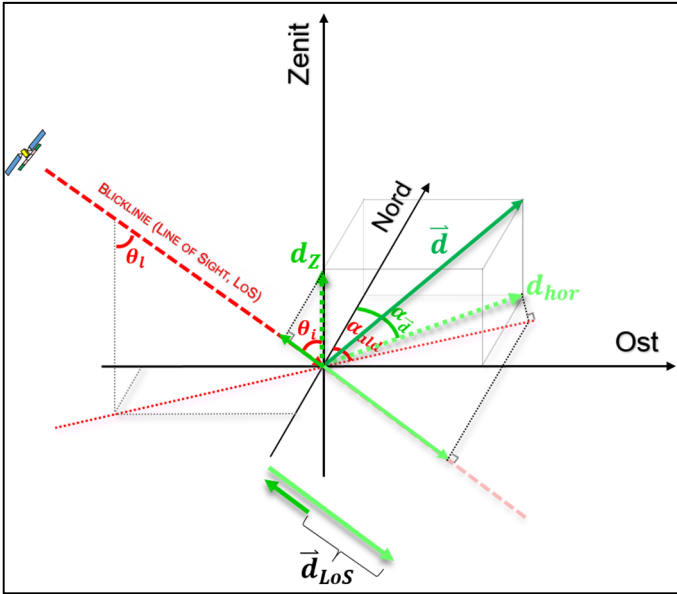


Abbildung 18: Projektion eines Bewegungsvektors auf die Blicklinie des Sensors: Summenbildung der auf die Blicklinie projizierten horizontalen und vertikalen Bewegungskomponenten des Bewegungsvektors

$$d_{LoS} = d_z \cdot \cos \theta_i - d_{hor} \cdot \cos(\alpha_d - \alpha_{ald}) \cdot \sin \theta_i \quad (3-27)$$

Noch allgemeiner können die einzelnen Komponenten einer Punktbewegung, die im Rahmen dieser Arbeit die Bodenbewegung beschreibt, auf die Blicklinie projiziert werden. Wenn, wie es in Abbildung 19 beispielhaft dargestellt, die Bewegung \vec{d} in eine vertikale und zwei horizontale Bewegungskomponenten (wie in Abbildung 1) aufgeteilt wird, die sich auf die Nord-Süd- und Ost-West-Richtung beziehen.

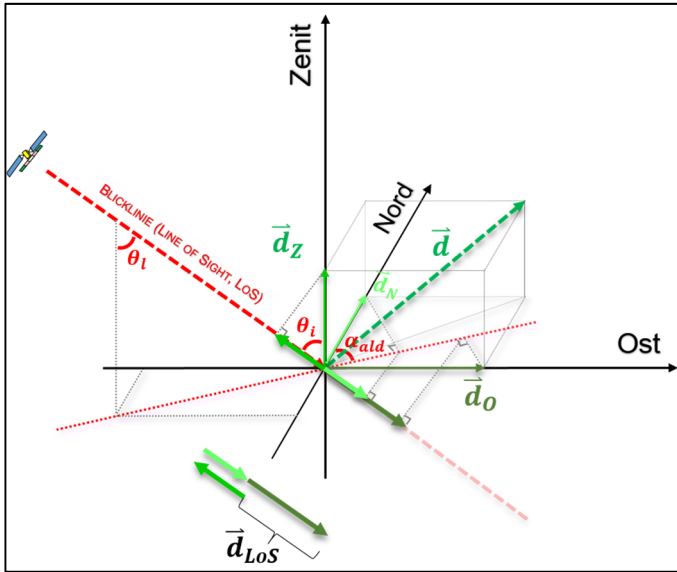


Abbildung 19: Projektion eines Bewegungsvektors auf die Blicklinie des Sensors: Summenbildung der einzelnen, auf die Blicklinie projizierten Komponenten des Bewegungsvektors

Der in der Blickrichtung des Sensors messbare Anteil d_{LoS} (sog. LoS-Bewegung) einer realen Punktbewegung ergibt sich dann durch die Summenbildung der einzelnen auf die Blicklinie projizierten Bewegungskomponenten, z. B. entsprechend der folgenden mathematischen Beziehung:

$$d_{LoS} = d_Z \cdot \cos \theta_i - (d_N \cdot \cos \alpha_{ald} + d_O \cdot \sin \alpha_{ald}) \cdot \sin \theta_i \quad (3-28)$$

Dabei ist θ_i der Einfallswinkel der Blicklinie (Winkel zwischen der Blicklinie und dem Zenit); α_{ald} ist das Azimut der Blickrichtung, der dem Winkel zwischen der auf die horizontale Fläche projizierten Blicklinie und der geographischen Nordrichtung entspricht (Abbildung 12).

3.3.4 Bewegungsrichtungsabhängige Empfindlichkeit der LoS-Messung

Mithilfe der Formeln (3-27) und (3-28) wird nicht nur der Zusammenhang zwischen einer LoS-Bewegung und den auf die Blickrichtung projizierten Komponenten einer realen Punktbewegung ausgedrückt sondern auch gezeigt, dass die Punktbewegungskomponenten einen unterschiedlich großen Anteil an der LoS-Bewegung haben. Eine detektierte LoS-Bewegung besitzt somit je nach Blickrichtung unterschiedliche Empfindlichkeiten bezogen auf die einzelnen Bodenbewegungskomponenten.

Unter der Empfindlichkeit eines Sensors kann gemäß DIN 1319-1 (Deutsches Institut für Normung e. V., 1995a) die „Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Messgerätes bezogen auf die sie verursachende Änderung des Wertes der Eingangsgröße“ verstanden werden. Wenn die Ausgangsgröße durch eine Funktion der Eingangsgröße beschrieben werden kann, kann die Änderung der Ausgangsgröße bezogen auf die sie verursachende Änderung der Eingangsgröße mittels der (partiellen) Ableitung der Funktion bestimmt werden. Hierbei entsprechen die Ausgangsgröße und die Eingangsgröße jeweils der ermittelten LoS-Bewegung und der resultierenden Bodenbewegungskomponenten. Somit können die Empfindlichkeit einer LoS-Messung für die horizontale und die vertikale Bodenbewegungskomponente nach Formel (3-29) und (3-30) berechnet werden.

$$\frac{\partial d_{LoS}}{\partial d_{hor}} = -\cos(\alpha_{\tilde{d}} - \alpha_{ald}) \cdot \sin \theta_i \quad (3-29)$$

$$\frac{\partial d_{LoS}}{\partial d_z} = \cos \theta_i \quad (3-30)$$

Ebenfalls kann, in Anlehnung an Formel (3-28), die Empfindlichkeit für die Nord-Süd- und die Ost-West-Bewegungskomponenten gemäß Formel (3-31) und (3-32) bestimmt werden.

$$\frac{\partial d_{LoS}}{\partial d_o} = -\sin \alpha_{ald} \cdot \sin \theta_i \quad (3-31)$$

$$\frac{\partial d_{LoS}}{\partial d_N} = -\cos \alpha_{ald} \cdot \sin \theta_i \quad (3-32)$$

Mit diesen Empfindlichkeitsangaben kann bei Vorliegen von mehreren Eingangsgrößen auch die Relation der Empfindlichkeiten der einzelnen Eingangsgröße auf den Ausgangswert abgeleitet werden. Aus den obigen Formeln ist zu erkennen, dass die Empfindlichkeit der LoS-Messung bezogen auf die jeweiligen Bodenbewegungskomponenten vom Einfallswinkel und dem Azimut der Blickrichtung abhängt.

An Beispiel einer Descending-Aufnahme von Envisat ASAR, dass bei einem der Einfallswinkel und einem Azimut der Blickrichtung von ca. 23° und ca. 283° die Empfindlichkeit für die horizontale Bewegungskomponente etwa $-0,39 \cdot \cos(\alpha_{\tilde{d}} - \alpha_{ald})$ und für die Höhenänderung 0,92 beträgt. Da der Wert des Kosinus zwischen -1 und 1 liegt, kann die Empfindlichkeit für die Horizontalbewegung maximal einen Wert von ca. 0,39 annehmen. Ferner beträgt die Empfindlichkeit für die Ost-West- und Nord-Süd-Bewegungskomponente bei der beispielhaft genannten Aufnahmegeometrie jeweils 0,38 und -0,09. Diese Empfindlichkeitsangaben lassen sich wie folgt interpretieren: Die LoS-Messung ist ungefähr 2,4-fach empfindlicher für eine Vertikalbewegung d_z als für eine

Horizontalbewegung, und die Ost-West-Horizontalbewegungskomponente besitzt eine 4,2-fach höhere Empfindlichkeit als die Nord-Süd-Bewegung.

Das Empfindlichkeitsverhältnis zwischen vertikaler Bewegung und horizontaler Bewegung hängt somit hauptsächlich vom Einfallswinkel ab. Bei einem steilen Einfallswinkel unter 45° ist die Empfindlichkeit für eine Höhenänderung stets höher als für eine Horizontalbewegung. Dagegen ist das Empfindlichkeitsverhältnis für die zwei horizontalen Komponenten zusätzlich abhängig vom Azimut der Blickrichtung, welcher bei den meisten Sensoren nur wenig variiert. Diese Zusammenhänge zwischen den Empfindlichkeiten für die jeweiligen Bodenbewegungskomponenten spielen bei der Auswahl der Daten und der Annahmen wichtige Rollen, wenn eine bestimmte Bewegungskomponente aus einer einzelnen LoS-Messung zu ermitteln ist. Somit sollte z. B. für die Ermittlung von Höhenänderungen unter Nutzung von Einzelaufnahmegeometrie die möglichst steil auf die Erde blickenden Aufnahmen verwendet werden.

Die LoS-Bewegungen an jedem PS-Punkt, welche aus einem Stapel mit Radaraufnahmen nur eines Tracks ermittelt wurden, stellen eine Zeitreihe einer eindimensionalen Größe auf der Blicklinie des Sensors dar, welche ohne weitere Umrechnungen im Sinne der Erfassung von Bodenbewegungskomponenten (siehe Kapitel 2.1) nicht von Interesse ist. In Kapitel 4 werden die Verfahren zur Bestimmung von Bodenbewegungskomponenten vorgestellt. Die Hauptaugenmerke liegen auf den Verfahren mit lediglich einer LoS-Messung und zwei LoS-Messungen. Dabei werden insbesondere die systematischen Abweichungen, welche durch die Konstellationen der Eingangsdaten und die Annahmen der jeweiligen Verfahren entstanden sind, modelliert und untersucht. Zudem werden die statistischen Unsicherheiten, die ebenfalls mit den Konstellationen und Unsicherheiten der Eingangsdaten zusammenhängen, theoretisch abgeleitet, um darüber hinaus die Qualität der damit berechneten Bewegungskomponenten zu diskutieren.

4 Theorie zur Bestimmung von Bodenbewegungskomponenten mittels LoS-Messungen

Wie im vorherigen Kapitel bereits dargelegt wurde, setzt sich die Bewegung eines Punktes aus drei orthogonal zueinanderstehenden Komponenten zusammen. Um die Ost-West- und Nord-Süd-Bewegungskomponenten und Höhenänderung aus LoS-Messungen berechnen zu können, sind mindestens drei, linear unabhängigen Richtungen aufgenommenen Szenestapel über demselben Gebiet im gleichen Zeitraum nötig. Somit kann das lineare Gleichungssystem (LGS) (4-1) mit den drei Unbekannten d_O, d_N, d_Z , die jeweils einer Bewegungskomponente entsprechen, für jeden Messpunkt im Überlappungsgebiet und Zeitraum aufgestellt werden. Die Suche nach der Lösung von diesem linearen Gleichungssystem $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$ führt zur kompletten Lösung der Bodenbewegungskomponenten.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

$$\begin{pmatrix} -\sin \theta_{i,1} \cdot \sin \alpha_{ald,1} & -\sin \theta_{i,1} \cdot \cos \alpha_{ald,1} & \cos \theta_{i,1} \\ -\sin \theta_{i,2} \cdot \sin \alpha_{ald,2} & -\sin \theta_{i,2} \cdot \cos \alpha_{ald,2} & \cos \theta_{i,2} \\ -\sin \theta_{i,3} \cdot \sin \alpha_{ald,3} & -\sin \theta_{i,3} \cdot \cos \alpha_{ald,3} & \cos \theta_{i,3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_O \\ d_N \\ d_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{LoS,1} \\ d_{LoS,2} \\ d_{LoS,3} \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

Aufgrund der Datenverfügbarkeit von Radarszenen wird dieser Idealfall jedoch i. d. R. für kein, oder nur für wenige Gebiete erreicht. D. h. das Gleichungssystem (4-1) ist in den meisten Fällen unterbestimmt und nur unter Annahmen lösbar. Im Hinblick auf der steigenden Schwierigkeit bei der Zunahme der benötigten Daten, sowie der Situation in der Praxis, dass die SAR-Daten nur in begrenzten Kombinationen von Konstellation zur Verfügung stehen, sollen in dieser Arbeit die Verfahren zur Ermittlung von Bodenbewegungskomponenten untersucht werden, die weniger als drei richtungsverschiedene LoS-Messungen benötigen und im Sinne des definierten allgemeinen Falls (siehe Kapitel 1.2) mit kostenfreien Daten umgesetzt werden können.

Als Einführung werden die bekannten Verfahren aus einschlägigen Literaturen rezensiert. Danach erfolgt eine Bewertung der Anwendbarkeit dieser Verfahren für den allgemeinen Fall. Im darauffolgenden Unterkapitel werden die „klassische“ Methode zur Ermittlung der vertikalen Bodenbewegungskomponente mittels der Einzelaufnahmegeometrie (Single-Track) unter bestimmten Modellannahmen erläutert und die sich ergebenden systematischen Abweichungen ausführlich dargelegt. Hierauf aufbauend erfolgt im dritten Unterkapitel die Erläuterung von Auswertansätzen mittels zwei LoS-Messungen zur Bestimmung der verschiedenen Bodenbewegungskomponenten. Dabei wird besonderes Augenmerk gelegt auf die Untersuchung systematischer Abweichungen infolge der

Modellannahmen und auf die statistische Unsicherheit der ermittelten Bodenbewegungskomponenten unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der LoS-Bewegungen.

4.1 Bekannte Verfahren zur Bestimmung der Bodenbewegungskomponenten

Bemühungen, um die LoS-Bewegungen im Sinne der Bodenbewegungen wahrheitsnah zu interpretieren, gab es, seitdem die radarinterferometrischen Verfahren zur Erfassung von Bodenbewegungen eingesetzt wurden. Wie bereits in Kapitel 2.2 dargelegt, sind die Höhenänderung, welche sich auf die Lotrichtung bezieht, und die dazu orthogonal stehende Horizontalbewegung die interessierenden Größen bei der Bodenbewegungsanalyse. Um diese Bodenbewegungskomponenten zu bestimmen, werden generell LoS-Messungen in unterschiedlichen Blickrichtungen benötigt. Daher können die bekannten Verfahren zur Erfassung dieser Bodenbewegungskomponenten entsprechend der Anzahl der benötigten LoS-Messungen unterteilt werden in:

- Einzelaufnahmegeometrie (1 LoS-Messung),
- Zweiaufnahmegeometrie (2 LoS-Messungen),
- und Multiaufnahmegeometrie (≥ 3 LoS-Messungen).

In Anlehnung an die Anzahl der vorhandenen LoS-Messungen lassen sich diese Verfahren auch durch die mögliche Ableitung

- eindimensionaler,
- zweidimensionaler,
- und dreidimensionaler Bodenbewegungen

charakterisieren.

Eine eindimensionale Bodenbewegung (eine Bodenbewegungskomponente) ergibt sich im Allgemeinen durch die Projektion einer eindimensionalen LoS-Bewegung auf eine ausgewählte Richtung. Dabei werden die anderen Bodenbewegungskomponenten in den orthogonal dazu stehenden Richtungen vernachlässigt. Bezogen auf ein geodätisches, dreidimensionales Koordinatensystem, bei dem sich die Horizontalbewegungen in eine Nord-Süd- und eine Ost-West-Komponente aufspalten lassen (Abbildung 1), ist meist die Höhenänderung d_z die abgeleitete eindimensionale Bodenbewegungskomponente.

In diesem Kontext werden als zweidimensionale Bodenbewegungen bevorzugt die Bodenbewegungskomponenten d_o in der Ost-West- Richtung und die Höhenänderung d_z durch die Kombination von zwei LoS-Messungen abgeleitet.

Die Nord-Süd-Bewegungskomponente wird wegen der geringen Empfindlichkeit dieser Aufnahmekonstellation in der Nord-Süd-Richtung bei der kombinativen Berechnung nicht berücksichtigt (Details siehe Kapitel 4.3).

In Tabelle 2 sind die Anzahl sowie Kombinationen der LoS-Messungen und die jeweils ableitbaren Bodenbewegungskomponenten in Beziehung gesetzt und zusammengestellt. Ergänzend sind die bekannten und in der Praxis anwendbaren Ansätze mit aufgeführt, die eine Ableitung der Bodenbewegungskomponenten zusammen mit den PSI-Ergebnissen ermöglichen. In den folgenden Unterkapiteln von Kapitel 4.1 werden die aus den einschlägigen Literaturen bekannten Verfahren im Zusammenhang mit den dafür erforderlichen LoS-Messungen detailliert dargelegt.

Tabelle 2: Bekannte Verfahren zur Ermittlung von Bodenbewegungen und deren Einsatzmöglichkeiten

| | | Erzielbare Ergebnisse | | |
|---|--|---|---|---|
| | | Eindimensionale Bodenbewegungen d_z | Zweidimensionale Bodenbewegungen d_z, d_o | Dreidimensionale Bodenbewegungen d_z, d_o, d_N |
| Anzahl der sich über- schneidenden LoS- Messungen | 1 LoS- Messung (asc o. desc) | Projektion über Einfallswinkel, Vernachlässigung der Horizontalbewegung | - | Mittels Bodenbewegungsm odell, wodurch die Bewegungsrichtung (3D) bekannt wird |
| | | | | Punktuell mithilfe geodätisch ermittelter Messdaten, z. B. GNSS-Messungen |
| | 2 LoS- Messungen (asc u./o. desc) | - | Kombinative Berechnung, Vernachlässigung der Nord-Süd- Bewegungskomponente | Mittels Bodenbewegungsm odell, wodurch die horizontale Bewegungsrichtung (2D) bekannt wird |
| | | | | Punktuell mithilfe geodätisch ermittelter Messdaten, z. B. GNSS-Messungen |
| | ≥ 3 LoS- Messungen (asc u./o. desc) | - | - | Lösen des LGS mathematisch möglich |

4.1.1 Einzelaufnahmegeometrie

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist, lässt sich aus einer Aufnahmegeometrie theoretisch/mathematisch die Höhenänderung ableiten. Da eine LoS-Messung mit

einem Einfallswinkel kleiner als 45° am empfindlichsten gegenüber Höhenänderungen ist (Kapitel 3.3.4), lassen sich LoS-Messungen in die vertikale Richtung konvertieren, indem die Daten unter Verwendung des Sensoreinfallswinkels auf die Lotrechte zurück projiziert werden. Mathematisch ergibt sich die Höhenänderung, indem die LoS-Bewegung durch den Cosinus des Einfallswinkels dividiert wird. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, dass keine horizontale Bodenbewegung stattgefunden hat. Eine detaillierte Herleitung dieses Verfahrens und eine Untersuchung der Auswirkungen der getroffenen Annahme erfolgt in Kapitel 4.2. Bei Nutzung dieses annahmebasierten Verfahrens werden in vielen Untersuchungen auch die Auswirkungen einer Vernachlässigung der horizontalen Bewegungskomponenten thematisiert, z. B. Raspini et al. (2013) u. Busch et al. (2016).

So haben Studien in der Praxis, wie z. B. von Samieie-Esfahany et al. (2009) und Busch et al. (2018), gezeigt, dass die Vernachlässigung von horizontalen Bewegungen, insbesondere bei der Erfassung von bergbaubedingten Bodenbewegungen, zu falschen Werten der aus radarinterferometrischen Auswertungen abgeleiteten Höhenänderungen führen können. Wenn eine Horizontalbewegung orthogonal zur LoS-Richtung erfolgte, ist sie allerdings in den LoS-Messwerten nicht erkennbar (Busch, et al., 2018). Bei bestimmten Bodenbewegungssituationen können die horizontalen Bodenbewegungen je nach Position innerhalb des Bewegungsgebietes sogar betragsmäßig größer als die vertikale Bewegungskomponente sein. Trotzdem wurde und wird dieses Verfahren zur Ermittlung von Höhenänderungen aus nur einer LoS-Bewegung angewendet, wenn die Datenverfügbarkeit und / oder die höheren Datenbeschaffungskosten (und Auswertekosten bei den anderen Verfahren) die Anwendung anderer Verfahren nicht zulässt. Eine ausführliche Auseinandersetzung mit dem dabei auftretenden Fehler Einfluss auf die abgeleitete Höhenänderung erfolgt in Kapitel 4.2. Weitere Informationen zu dieser Thematik, zum Vergleich und zur Unterstützung der Herangehensweise finden sich in Fuhrmann & Garthwaite (2019).

Ähnliche Modellannahmen (wie die Vernachlässigung von Horizontalbewegungen) können je nach Anwendungsbereich aufgrund der bewegungsmechanischen Eigenschaften des zu beobachtenden Objektes auch anders getroffen werden. Das Ziel solcher Annahmen ist dann allerdings die Ableitung eines dreidimensionalen Richtungsvektors für die „tatsächlich“ entstandenen Bewegungen. So wurde z. B. in Lazecký et al. (2014) für ein Brücken-Monitoring die Bewegungsrichtung wegen der thermalen Ausdehnung der Brücke in einer horizontalen Richtung angenommen, die eine direkte Projektion einer LoS-Bewegung in die gegebene Bewegungsrichtung ermöglichte.

Weitere Entwicklungen für die Nutzung der Einzelaufnahmegeometrie lassen die Ableitung dreidimensionaler Bodenbewegungen zu, indem komplexe (und anerkannte) Bodenbewegungsmodelle eingesetzt werden, mit denen z. B. die Beziehung zwischen der untertätigen Fluidvolumenänderung und der dreidimensionalen Deformation der Erdoberfläche bei Erdgaslagerstätten ermöglicht wird (Liu, et al., 2017).

4.1.2 Zweiaufnahmegeometrie

Mit zwei LoS-Messungen aus zwei linear unabhängigen Aufnahmerichtungen kann ein unterbestimmtes LGS mit zwei Gleichungen gebildet werden, d. h. $\text{rank}(\mathbf{A}) = \text{rank}([\mathbf{A}, \mathbf{b}]) = 2$. Hierbei beziehen sich die Matrizenangaben auf das Gleichungssystem (3-29). In früheren Arbeiten, z. B. Wright et al. (2004), Hu et al. (2014), Pepe et al. (2016) u. Fuhrmann & Garthwaite (2019), wurde bereits betont, wie wichtig es ist, LoS-Bewegungen aus mehreren Aufnahmegeometrien zu kombinieren, um die Bewegungskomponenten zu erfassen. Hierbei ist entscheidend und grundlegend, dass die unabhängigen LoS-Messungen für dasselbe Gebiet und denselben Zeitraum zur Verfügung stehen. Die Verfügbarkeit einer kombinierbaren Aufnahmegeometrie kann je nach Lage des Untersuchungsgebietes und dem Untersuchungszeitraum stark variieren. Eine Einteilung dieser Kombinationen lässt sich in folgende Kategorien (immer unter Berücksichtigung desselben Zeitraumes) vornehmen:

- zwei sich kreuzende Tracks (d. h. räumlich sich überlappende Ascending- und Descending-Aufnahmen eines Sensors),
- zwei parallel verlaufende Tracks (z. B. im Überlappungsbereich von zwei Descending-Aufnahmen mit verschiedenen Einfallswinkeln rechtsblickender Sensoren).

Die wesentlichen Unterschiede dieser Kategorien liegen einerseits in den Blickrichtungen der zwei genutzten LoS-Richtungen. Auf der anderen Seite spielt die Kombination der konstellationsbedingten Winkel (Einfallswinkel und Azimut der jeweiligen Blickrichtung) eine wichtige Rolle. Auf diese Besonderheiten wird in Kapitel 4.3 und 4.4 im Detail eingegangen.

Die bisher meist verwendete Kategorie ist die Kombination aus Ascending- und Descending-Daten. Diese Aufnahmekonstellation wird in manchen englischsprachigen Literaturstellen, wie Ketelaar (2009) u. Yu et al. (2017), auch als „cross-heading orbit“ bezeichnet. Für dieses Verfahren finden sich in der Literatur eine Vielzahl von Oberbegriffen wie z. B.: Multi-Track- (Chang, et al., 2017), Multi-Pass- (Hu, et al., 2014) oder Multi-Geometrie-Verfahren (Fuhrmann &

Garthwaite, 2019). In dieser Arbeit wird dafür der Ausdruck „kombinative Berechnung mit sich kreuzenden Tracks“ verwendet.

Die Grundidee dieses Verfahrens kann im Allgemeinen wie folgt zusammengefasst werden: Wenn LoS-Messungen (polarnahe Flugbahn, siehe Kapitel 3.1.2) sowohl von Ascending- als auch von Descending-Aufnahmerichtungen verfügbar sind, ist es möglich, durch eine Kombination der LoS-Bewegungen in beiden Richtungen die vertikale Komponente und die horizontale Ost-West-Bewegungskomponente zu ermitteln. Da üblicherweise die Blickrichtungen der beiden Aufnahmekonstellationen in der horizontalen Ebene nur mit kleinem Winkel (ca. $8 - 12^\circ$) (aus der Ost-West-Richtung) nach Norden geneigt sind, sind die LoS-Messungen für die Bewegungskomponente in der Nord-Süd-Richtung nicht oder nur gering empfindlich. Zudem lässt sich die Nord-Süd-Bewegungskomponente wegen der fehlenden dritten Messung mathematisch nicht bestimmt werden. Gleichwohl ist die Ermittlung der beiden Komponenten wegen der Unempfindlichkeit der LoS-Messungen in der Nord-Süd-Richtung unter Annahmen möglich, wie z. B. durch die Vernachlässigung der Nord-Süd-Komponente. Hierzu können zahlreiche Anwendungsbeispiele in den Veröffentlichungen der vergangenen Jahre gefunden werden, z. B. im Bereich der Analyse von Horizontalbewegung mittels des Kratzsch'schen Modells im Gas- und Salzproduktionsfeld (Samieie-Esfahany et al., 2009), bzw. der Erfassung von Hangrutschungen (Tofani et al., 2013), Senkungen im Flussdelta (Samsonov et al., 2014), Vulkanen (Vajedian et al., 2015) und Hebungen aus geogenem (Refice et al., 2016) und anthropogenem (Yin & Busch, 2018) Ursprung.

Es ist zu beachten, dass trotz der fortgeschrittenen Entwicklung dieses Verfahrens und der großen Anzahl von Anwendungsbeispielen eine strukturierte Ableitung und Diskussion über die Fehlereinflüsse in den abgeleiteten Ergebnissen nur selten zu finden ist. Eine der wenigen Ausnahmen stellt die Arbeit von Samsonov & d'Oreye (2012) dar, in der die Einflüsse der nicht berücksichtigten Nord-Süd-Komponente auf die Ost-West-Komponente und die Höhenänderung durch simulierte Daten in Form von Zeitreihen dargelegt wird. Deshalb soll in dieser Arbeit theoretisch, wie auch anwendungsorientiert untersucht werden, wie sich die fehlende dritte Messrichtung auf die berechneten Ost-West und Vertikal-Bewegungskomponenten auswirkt. Grundlage dafür ist eine mathematische Beschreibung der geometrischen Zusammenhänge in Kapitel 4.3.

In Chang et al. (2017) wurden zwei LoS-Messungen verwendet, welche aus derselben Aufnahmerichtung stammten, anstatt aus zwei unterschiedlichen, jedoch mit einer Differenz im Einfallswinkel von ca. 5° . Mit diesem Ansatz kann mathematisch die vertikale Bewegungskomponente und die auf die horizontale

Blickrichtung projizierte Horizontalbewegung ermittelt werden. Allerdings besteht die Gefahr, dass die Ergebnisse wegen der kleinen Differenz zwischen den Einfallswinkeln durch „Störungen“ in den Eingangsdaten beeinflusst und somit eine niedrige Qualität aufweisen werden. Die zweite horizontale Bewegungskomponente lässt sich nicht ableiten. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit als kombinatorische Berechnung, allerdings mit parallelen Tracks, ebenfalls untersucht.

Um das Problem der fehlenden Nord-Süd-LoS-Komponente bei der kombinatorischen Berechnung zu überwinden, wurden verschiedene Verfahren unter der Nutzung von zwei LoS-Messungen entwickelt, um die Ableitung der fehlenden dritten Bewegungskomponente zu ermöglichen. Für große Bewegungsereignisse ist es möglich, die vollständige dreidimensionale Bewegungskomponente mit einer Bewegung in Azimut-Richtung wiederherzustellen, die vom Verfahren „pixel offset tracking“ (Fialko, et al., 2001) (Fialko, et al., 2005) (Hu, et al., 2010) (De Michele, et al., 2010) oder dem Verfahren „multi-aperture InSAR (MAI)“ (Bechor & Zebker, 2006) (Jung & Hong, 2017) abgeleitet wird. Unterschiedliche Ansätze zum Lösen der dreidimensionalen Bewegungskomponenten aus InSAR-Verfahren werden in Hu et al. (2014) beschrieben. Generell kann das Verfahren „pixel offset tracking“ für schnelle und große Bewegungen eingesetzt werden, die in der Regel größer als 10 – 12 cm sind (Pepe & Calò, 2017). Das Verfahren „multi-aperture InSAR“ misst Bodenbewegungen durch die differentiellen Interferogramme von den neu aufgeteilten Aperturen eines SAR-Paares. Somit hängt die Genauigkeit der MAI von der interferometrischen Kohärenz ab und ist im Allgemeinen höher als die des pixel offset trackings (Bechor & Zebker, 2006) (Jung, et al., 2014). Die beiden Verfahren werden dennoch aufgrund deren spezieller Prozessierung kaum zusammen mit PSI-Verfahren verwendet, auch wenn sie für die Beseitigung der systematischen Abweichung der kombinatorischen Berechnung hilfreich sein können. Allerdings wird wegen der Genauigkeit der einzelnen Messungen in dieser Arbeit nicht weiter darauf eingegangen.

Bei der kombinatorischen Berechnung mit nur zwei Ascending- und Descending-Datensätzen können auch Bewegungsmodelle eingesetzt werden, um z. B. die horizontale Bewegungsrichtung an jeder zu ermittelnden Position abzuleiten und somit die Nord-Südbewegungskomponente aus der Ost-West-Bewegungskomponente zu berechnen oder die Höhenänderung dadurch zu verbessern (Samieie-Esfahany, et al., 2009) u. (Yu, et al., 2017).

4.1.3 Drei oder mehr Aufnahmegeometrie

Gibt es drei oder mehr zeitlich sich überlappende LoS-Messungen aus verschiedenen Blickrichtungen für ein Gebiet, so könnte für dieses Gebiet (und den gemeinsamen Zeitraum) die Möglichkeit entstehen, das Gleichungssystem (4-1)

mathematisch komplett zu lösen und die drei Bewegungskomponenten zu bestimmen. In der Praxis hängt die Anwendbarkeit dieser Kombination von der Verfügbarkeit der tatsächlich vorhandenen Aufnahmekonstellationen ab. Unter diesem Gesichtspunkt kann man die denkbaren Kombinationen von Datensätzen grundsätzlich in zwei Arten von Konstellationskombinationen einteilen:

- Ascending- und Descending-Aufnahmen aus verschiedenen Tracks von rechtsblickenden Satelliten mit polarnaher Flugbahn, oder
- Ascending- und Descending-Aufnahmen aus rechtsblickenden Satelliten mit polarnaher Flugbahn und ergänzt um eine von Norden nach Süden blickende Aufnahme.

Für den zweiten Fall könnte die Messung, die bevorzugt in der Blickrichtung von Norden nach Süden erfolgt, theoretisch aus SAR-Satelliten mit z. B. geostationärer Flugbahn (Hu, et al., 2017) oder linksblickendem Modus (Wright, et al., 2004) stammen. Solche Daten, insbesondere aus SAR-Satelliten mit geostationärer Flugbahn, liegen allerdings nur mit sehr beschränkten Zugangsmöglichkeiten vor, bzw. deren Datenabdeckung ist nur für wenige Gebiete und für begrenzte Zeiträume gegeben, d. h. für die Ermittlung von Bodenbewegungskomponenten in Zeitreihen ist dieser Ansatz im Allgemeinfall kaum realisierbar.

Im Vergleich zum zweiten Ansatz ist die Umsetzung des ersten Ansatzes durch die kontinuierliche Aufnahme und sich überlappenden Tracks von Satelliten wie Envisat ASAR und Sentinel-1 realistischer. In vielen Fällen wird dieser Ansatz direkt in Kombination mit dem Verfahren von „Small Baseline Subset (SBAS)“ verwendet (Samsonov & d'Oreye, 2012). Hierbei ist es zu beachten, dass die Lösung des vollbestimmten Gleichungssystems (4-1) durch drei LoS-Messungen nur im streng mathematischen Sinne möglich ist. Das Limit dieses Ansatzes besteht darin, dass die Lösung des gebildeten linearen Gleichungssystems durch eine geringe Genauigkeit aufgrund der schlechten Kondition der Koeffizientenmatrix belastet wird (Fuhrmann & Garthwaite, 2019). Die Unsicherheit der Lösung kann aufgrund einer schlechten Kondition (ill-condition) des Gleichungssystems sehr hoch sein, indem zwei der LoS-Richtungen sich nur geringfügig voneinander unterscheiden. Zum Beispiel beträgt die Konditionszahl des Gleichungssystems (4-1) nach L2-Norm ca. 91 bei einer Konstellation mit zwei Descending-Tracks ($\theta_i = 31^\circ$ u. 40° , $\alpha_{ald} = -77^\circ$ u. -79°) und einem Ascending-Track ($\theta_i = 41^\circ$, $\alpha_{ald} = 81^\circ$). Diese Konditionszahl ist deutlich größer als 1 und indiziert damit eine schlechte Kondition. Dies führt dazu, dass die Lösung des Gleichungssystems durch eine kleine Schwankung der LoS-Messwerte eine hohe Unsicherheit aufweisen könnte. Im Vergleich dazu weist die Koeffizientenmatrix des später noch näher zu erläuternden Gleichungssystems (4-13) bei einer kombinativen Berechnung mit zwei sich kreuzenden

Tracks (z. B. $\theta_i = 31^\circ, \alpha_{ald} = -77^\circ$ bei Descending und $\theta_i = 41^\circ, \alpha_{ald} = 81^\circ$ bei Ascending) eine Konditionszahl von ca. 1,4 auf, welche für die Lösung des Gleichungssystems eine kleinere „Empfindlichkeit“ zur Unsicherheit der Eingangsdaten gewährleistet. Bei einer kombinativen Berechnung mit zwei parallel zueinanderstehenden Tracks (z. B. Descending $\theta_i = 31^\circ$ u. $40^\circ, \alpha_{ald} = -77^\circ$ u. -79°) beträgt die Konditionszahl ca. 12,5, welche ebenfalls auf eine relativ hohe Unsicherheit in der kombinativen berechneten Lösung hindeutet. Ferner, die radarinterferometrisch ermittelten LoS-Bewegungen sind immer von verschiedenen Einflüssen, wie z. B. durch die Atmosphäre und Rauschen, belastet. Hinzukommend führen auch die Unterschiede der Aufnahmezeitpunkte, Rückstreuungszentren und Aufnahmebedingung zu Abweichungen der verwendeten LoS-Messungen untereinander bzw. Abweichungen zu tatsächlichen LoS-Bewegungen. Diese Abweichungen können beim obengenannten Gleichungssystem mit drei LoS-Messungen starke negative Auswirkungen auf die Lösung in Form von Messwertschwankungen hervorrufen. Abgesehen von der systematischen Abweichung bei der kombinativen Berechnung mit zwei sich kreuzenden Tracks stellt deren kleinere Konditionszahl des Gleichungssystems somit eine höhere Toleranz zur Unsicherheit der Eingangsdaten dar.

Um die Bewegungskomponenten mit einer verwertbaren Qualität zu ermitteln, werden Ausgleichungsverfahren bei der Nutzung von mehr als drei LoS-Messungen eingesetzt. Nichts desto trotz ist es bemerkenswert, dass in vielen Fällen die Nord-Süd-Komponente durch die geringe Empfindlichkeit der Aufnahmegeometrie in der Nord-Südrichtung nur mit geringer Genauigkeit abzuleiten ist, auch wenn 4 Datensätze, die jeweils von sowohl im links- als auch rechtsblickenden Aufnahmemodus erfasst sind, vorhanden wären (Wright, et al., 2004) (Fuhrmann & Garthwaite, 2019). Dies betrifft überwiegend die Bewegungskomponente in Nord-Südrichtung (Samsonov & d'Oreye, 2012) (Fuhrmann & Garthwaite, 2019), selbst wenn mehrere verschiedene Geometrien (in Fuhrmann & Garthwaite (2019) 7 unterschiedliche Aufnahmegeometrien von Envisat ASAR) verfügbar sind. Für die Zielsetzung (Kapitel 1.2) dieser Arbeit ist dieser Ansatz daher nicht geeignet.

4.1.4 Einsatzmöglichkeit für „den allgemeinen Fall“

Aus der Literaturrecherche in den vorherigen Absätzen ist erkennbar, dass die Ableitung der verschiedenen Bodenbewegungskomponenten mittels radarinterferometrischer Verfahren noch nicht für eine praktische Anwendung „standardisiert“ ist. Dementsprechend wird in dieser Arbeit hierbei über den Kenntnisstand diskutiert.

Die verwendeten Ansätze nutzen vor allem zwei oder mehrere unterschiedliche LoS-Messungen zur Ableitung der Bodenbewegungskomponenten. Die Einsatzmöglichkeit von solchen Verfahren ist zunächst begrenzt durch die Anzahl der verfügbaren Aufnahmegeometrien. Deshalb muss als Erstes die Verfügbarkeit von nutzbaren Datensätzen geprüft werden.

In Rahmen dieser Arbeit soll ein Verfahren ausgewählt bzw. weiterentwickelt werden, welches die Bedürfnisse des allgemeinen Anwendungsfalls befriedigt. Im allgemeinen Anwendungsfall, wie bereits in Kapitel 1.2 definiert, sollen für ein beliebiges Gebiet in Europa Bodenbewegungen über einen Zeitraum während der letzten 10 Jahre bestimmbar sein. Damit sind vor allem die räumlichen und zeitlichen Abgrenzungen vorgegeben. In Abbildung 20 ist die zeitliche Verfügbarkeit der aktuellen SAR-Satelliten aufgelistet, und der Untersuchungszeitraum für den allgemeinen Fall mit einer grünen Fläche markiert.

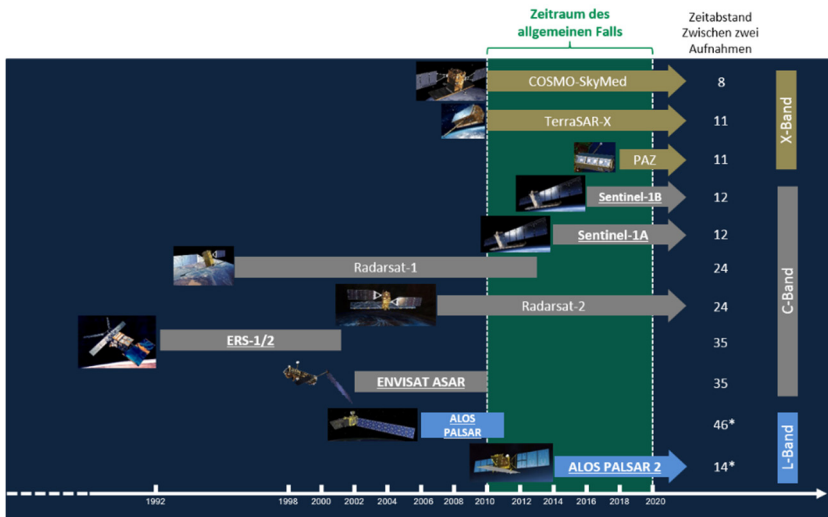


Abbildung 20: Verfügbare Zeiträume und Wiederholungsraten in Tagen der aktuellen SAR-Satelliten. (*Die Angaben zu den Wiederholungsraten von ALOS bezieht sich auf dem Zeitabstand zwischen zwei Aufnahmezyklen.)

Der Untersuchungszeitraum wird durch 9 SAR-Missionen abgedeckt, die theoretisch SAR-Daten liefern könnten. Da Datenstapel mit mindestens 15 - 20 Radarszenen in einer ausreichend langen Zeitspanne für PSI-Auswertung erforderlich sind, könnten vornehmlich 5 Missionen für die Erfüllung dieser Anforderung interessant sein: Sentinel-1, ALOS PALSAR-2, Radarsat-2, TerraSAR-X und COSMO-SkyMed. Davon können Sentinel-1- und ALOS PALSAR-2-Da-

ten kostenfrei bezogen werden; die Daten von ALOS stehen jedoch, nach Befürwortung eines zu stellenden Forschungsantrages, nur für Forschungszwecke zur Verfügung.

Außerdem ist zu bedenken, dass sich die in Abbildung 20 genannte Wiederholungsrate von ALOS PALSAR-2 Aufnahmen auf den zeitlichen Abstand zwischen zwei Aufnahmezyklen bezieht, welche jedoch dem tatsächlichen Zeitabstand zweier aufeinanderfolgenden ALOS-Aufnahmen nicht entspricht. Da der Aufnahmeschwerpunkt der ALOS-Mission auf der Beobachtung von tektonisch verursachten Bodenbewegungen liegt, werden die europäischen Bereiche, die sich nicht in tektonisch aktiven Zonen befinden, nicht bei jedem Aufnahmezyklus aufgezeichnet. Daten aus dem Modus „Fine Beam“, welcher für die Erfassung von anthropogen verursachten Bodenbewegungen am geeignetsten ist, wurden bisher über Europa nur 2- bis 4-mal pro Jahr in der Ascending-Aufnahmerichtung regelmäßig aufgezeichnet. In der Descending-Aufnahmerichtung wurden ohne Bestellung nur die tektonisch aktiven Gebiete wie z. B. in Italien und der Türkei 1 - 2 Mal pro Jahr aufgenommen. Seit 2017 wird der mittel- bis südeuropäische Bereich von Deutschland bis Italien wegen des Bedarfs (Super Sites) zusätzlich 1-mal pro Jahr aufgenommen. Somit sind verfügbare Daten aus den beiden Aufnahmerichtungen von ALOS PALSAR-2 wegen der niedrigen Datenanzahl für PSI-Auswertungen ungeeignet.

Jedoch könnten, in Abhängigkeit von Bedarf und Nachfrage, Anwender in Zukunft auf mehr regelmäßige Aufnahmen im Bereich Europas aus der ALOS-Mission, sowie anderer aktuell laufender Missionen, hoffen und zurückgreifen. Der genannte Anwendungsfall einer retrospektiven Erfassung von Bodenbewegungen, welcher in der Praxis häufig auftritt, bleibt jedoch, bezogen auf die letzten 10 Jahre unerfüllt.

Die Daten der Sentinel-1 Mission sind im Rahmen des europäischen Copernicus Programms kostenfrei erhältlich und stehen im Raum Europa in der Descending-Aufnahmerichtung seit Ende 2014 und in der Ascending-Aufnahmerichtung seit Anfang 2015 alle 12 Tage durch Sentinel-1A im sog. Interferometric Wide Swath (IW) bereit. In diesem Modus wird die Erdoberfläche über sehr große Gebiete von 250 km x 250 km aufgenommen. Dabei wird eine Aufnahme (oder Szene) in der Blickrichtung des Sensors noch in drei Teilaufnahmestreifen (eng. Subswath) unterteilt, welche jeweils in der Flugrichtung von 9 – 10 Bursts erfasst sind (vgl. Abbildung 21a).

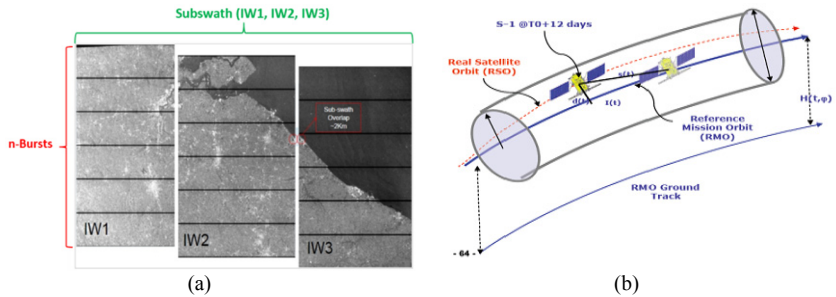


Abbildung 21: Aufnahme Prinzip von Sentinel-1A/B (Geudtner, et al., 2013) (European Space Agency - Sentinel-1 Team, 2013)

Zusammen mit dem baugleichen und im selben Orbit befindlichen Satelliten Sentinel-1B (vgl. Abbildung 21b) stehen Szenen ab etwa Oktober 2016 alle 6 Tage zur Verfügung. Dadurch sind ausreichend Daten in beiden Aufnahmerichtungen für PSI-Auswertungen in den letzten 5 Jahren vorhanden und somit sind die Daten von Sentinel-1 für den allgemeinen Fall (und in der Zukunft) geeignet. Die weitere Untersuchung der Einsatzmöglichkeit der jeweiligen Verfahren erfolgt deshalb auf Grundlage von Sentinel-1 - Daten.

In Abbildung 22 sind die Aufnahmebereiche in Europa der Ascending- und Descending-Aufnahmerichtung von Sentinel-1 schematisch am Beispiel der von der ESA zur Verfügung gestellten Aufnahmespuren vom 07.06.2017 bis zum 18.06.2017 dargestellt.

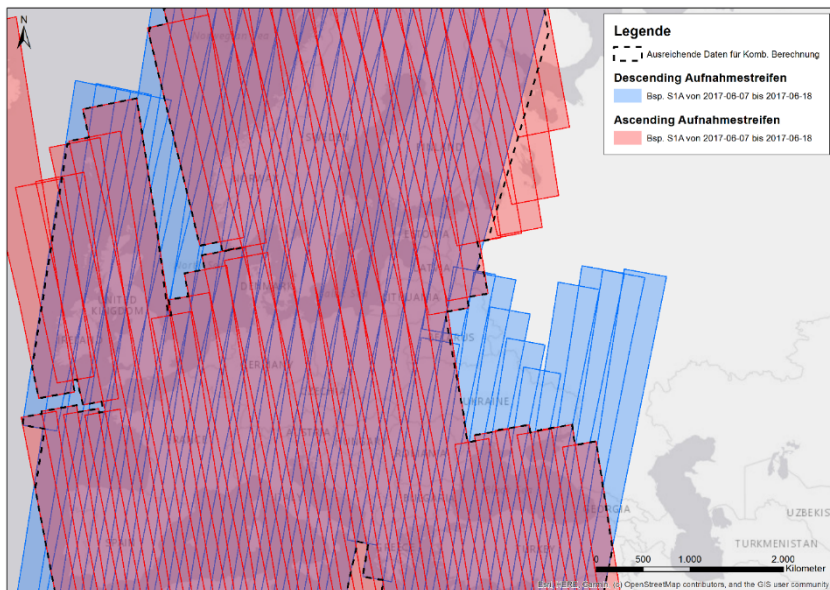


Abbildung 22: Aufnahmestreifen von Sentinel-1 in Ascending- (rot) und Descending-Aufnahmerichtungen (blau).

Die Aufnahmestreifen werden standardmäßig alle 6 bis 12 Tage wiederholt aufgezeichnet. Der europäische Raum ist von den beiden Aufnahmerichtungen mehrfach bedeckt, wodurch es für beliebige Gebiete in Europa mindestens je einen Datensatz von Ascending und Descending gibt. Damit ist die Ermittlung von Bewegungskomponenten mit der kombinativen Berechnung von Ascending- und Descending-Aufnahmen für große Teile Europas (Überlappungsbereich der roten und blauen Streifen in Abbildung 22, begrenzt durch die schwarz gestrichelte Linie) grundsätzlich durchführbar.

Darüber hinaus ist in Abbildung 22 zu erkennen, dass sich die Aufnahmestreifen jeder Aufnahmerichtung, jedoch mit unterschiedlichen Blickwinkeln (aus verschiedenen Tracks), ebenfalls überlappen. Solche Überlappungen setzen die kombinatorische Berechnung von Höhenänderungen mit zwei Tracks mit verschiedenen Einfallswinkeln aus derselben Blickrichtung voraus. Die Überlappungssituation der Aufnahmestreifen aus Ascending- und Descending-Aufnahmerichtungen in Europa zeigen die Abbildung 23 und Abbildung 24. Hierbei stellen die dunkleren Farbtöne die zunehmende Anzahl der sich überlappenden Aufnahmestreifen und damit der ableitbaren LoS-Messungen dar.

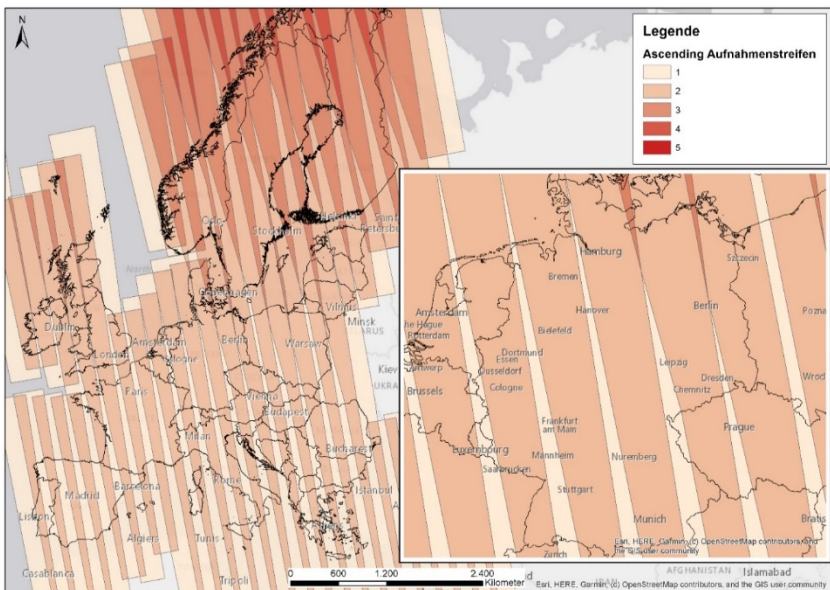


Abbildung 23: Datenverfügbarkeit der Ascending-Aufnahmerichtung von Sentinel-1 im europäischen Raum

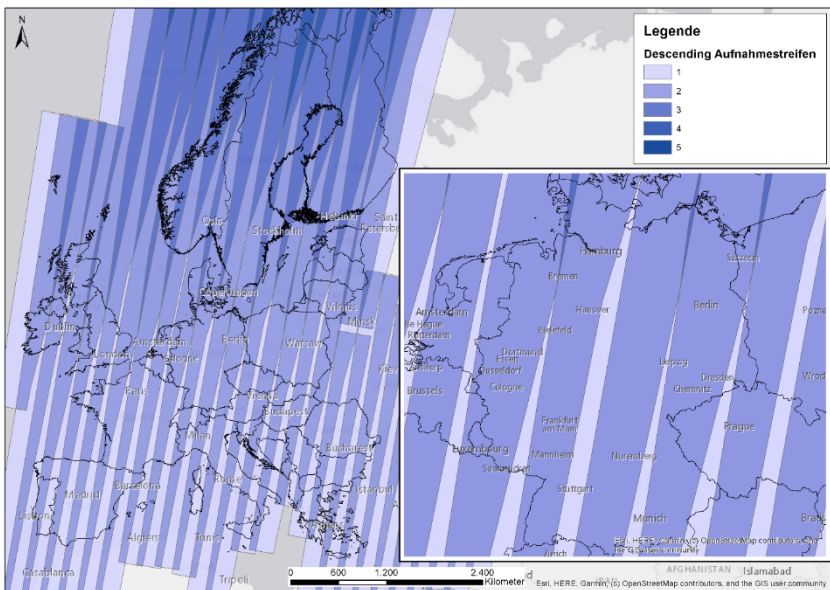


Abbildung 24: Datenverfügbarkeit der Descending-Aufnahmerichtung von Sentinel-1 im europäischen Raum

Es zeigt sich, dass der europäische Raum in großen Teilen mindestens zweifach aus derselben Aufnahme­richtung aufgezeichnet wird. Jedoch gibt es auch streifen­hafte Bereiche (hellrote Streifen in Abbildung 23 und hellblaue Streifen in Abbildung 24), in denen nur Daten aus einem Track der jeweiligen Aufnahme­richtung vorhanden sind. Diese Bereiche werden nach Süden hin immer größer. Im Gegensatz dazu stehen für manche Gebiete im Norden Europas, z. B. in Skan­dinavien, drei bis vier LoS-Messungen aus einer Aufnahme­richtung mit ver­schiedenen vertikalen Blickwinkeln zur Verfügung.

Durch Verschneidung der in Abbildung 23 und Abbildung 24 flächenhaft darge­stellten Anzahl der vorhandenen Aufnahme­geometrien können die Gebiete mit den verfügbaren Kombinationen ermittelt werden (Abbildung 25). In dieser Ab­bildung kennzeichnet die hellste grüne Farbe Bereiche, in denen nur jeweils ein LoS-Datensatz aus der Ascending- und der Descending-Aufnahme­richtung zur Verfügung steht, und dadurch die Mindestvoraussetzung für eine kombi­native Berechnung der Bodenbewegungskomponenten erfüllt wird. Dunklere grüne Farben zeigen eine Zunahme der verfügbaren Aufnahme­geometrien. In den blau gekennzeichneten Gebieten stehen Datensätze aus mehr als vier verschiedenen Aufnahme­richtungen zur Verfügung.

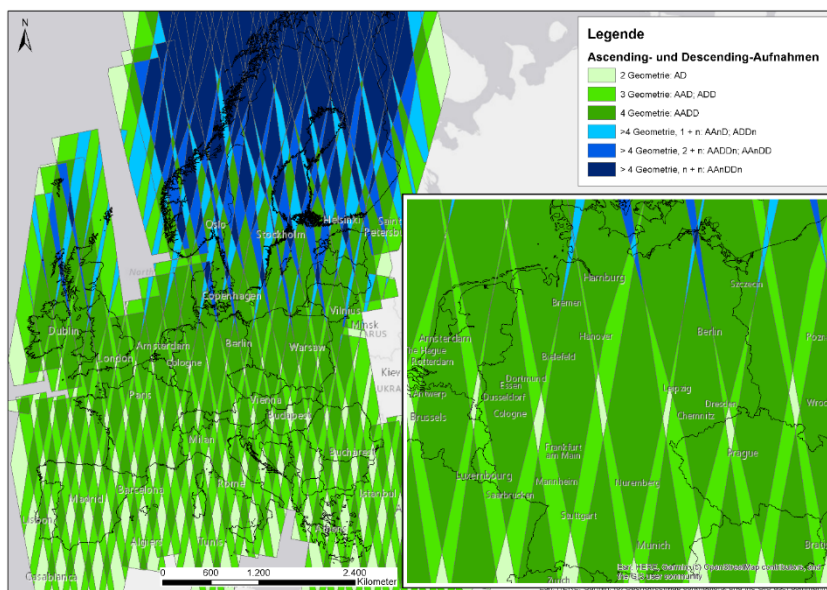


Abbildung 25: Verfügbarkeit der Aufnahme­richtungskombinationen von Sentinel-1 im euro­päischen Raum

Insgesamt lässt Abbildung 25 erkennen, dass in Mitteleuropa für sehr große Bereiche LoS-Datensätze aus 3 bis 4 Aufnahmerichtungen (und Blickwinkeln) (grün bis tiefgrün) vorliegen, und nur für abgegrenzte, kleinere Flächen (erkennbar durch die hellgrüne Farbe) lediglich Daten aus zwei Aufnahmegeometrien jeweils aus der Ascending- und Descending-Blickrichtung erfasst werden. In diesen kleinen Gebieten ist eine kombinatorische Auswertung mittels Daten aus zwei Tracks aus derselben Blickrichtung jedoch nicht möglich. Da in den meisten Gebieten Europas eine Auswertung gemäß dem allgemeinen Fall möglich ist, werden die theoretischen Grundlagen und Fehlereinflüsse dieses Verfahrens in Kapitel 4.4 dargelegt.

Der Multigeometrie-Ansatz kann dementsprechend in den meisten Bereichen Europas angewendet werden, und somit könnten für diese Gebiete auch alle drei Bodenbewegungskomponenten ermittelt werden. Bezüglich der Genauigkeit dieses Verfahrens wird in Fuhrmann & Garthwaite (2019) detailliert dargelegt, dass die Genauigkeit der abgeleiteten Höhenänderung und Ost-West-Bewegung mit einer zunehmenden Anzahl der verfügbaren LoS-Messungen steigen sollte. Da dieser Idealfall mit 4 oder sogar 7 verschiedenen Tracks nicht flächendeckend in Europa gegeben ist, wird in dieser Arbeit nicht weiter auf dieses Verfahren eingegangen.

4.2 Bestimmung von Bodenbewegungen mittels einer einzelnen Aufnahmegeometrie

4.2.1 Funktionaler Zusammenhang

Im vorherigen Kapitel wurde dargelegt, dass u.a. dank der Sentinel-Missionen eine gute und kostenfreie Datengrundlage geschaffen wurde, um eine Auswertung auf der Basis mehrerer Tracks, bzw. Aufnahmerichtungen durchzuführen. Bevor diese, heutzutage als selbstverständlich angenommene Situation (für Europa) erreicht wurde, lag der Fokus auf der Radarinterferometrie mit „Single-Track“. U.a. aufgrund der Datenverfügbarkeit wurden die meisten Auswertungen daher mit einem Datensatz durchgeführt, der nur aus den Radarszenen eines Sensors in einem einzelnen Track mit einer Aufnahmerichtung besteht. Anhand der aus einem einzelnen Datensatz ermittelten LoS-Bewegung kann der Betrag d des Bewegungsvektors $\vec{d} = (d_o \ d_N \ d_Z)^T$ nach der Gleichung (3-28) direkt berechnet werden, wenn der Winkel zwischen der Blicklinie $\vec{LoS} = (LoS_o \ LoS_N \ LoS_Z)^T$ und der Bewegungsrichtung $\vec{d}_0 = (d_{0,o} \ d_{0,N} \ d_{0,Z})^T$

bekannt ist. Hierbei entsprechen \overrightarrow{LoS} und \overrightarrow{d}_0 den Einheitsvektoren der Blicklinie und des Bewegungsvektors. Somit gelten die folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{d} &= d \times \overrightarrow{d}_0 \\ d &= \|\overrightarrow{d}\| = \frac{d_{LoS}}{\cos \vartheta} \\ \cos \vartheta &= -\frac{\overrightarrow{d} \cdot \overrightarrow{LoS}}{\|\overrightarrow{d}\| \times \|\overrightarrow{LoS}\|} = -(\overrightarrow{d}_0 \cdot \overrightarrow{LoS}) \\ &= -(LoS_O \cdot d_{0,O} + LoS_N \cdot d_{0,N} + LoS_Z \cdot d_{0,Z})\end{aligned}\quad (4-2)$$

Bei der Berechnung der Länge des Bewegungsvektors ist das Vorzeichen von d zu beachten. Eine Bewegung vom Sensor weg wird hierbei mit einem negativen Vorzeichen charakterisiert. Deswegen wird anstatt des Winkels zwischen \overrightarrow{LoS} und \overrightarrow{d}_0 sein Ergänzungswinkel verwendet (siehe Abbildung 12). Der Vektor \overrightarrow{LoS} kann somit durch den bekannten Einfallswinkel und das Azimut der Blickrichtung ausgedrückt werden:

$$\overrightarrow{LoS} = \begin{pmatrix} \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_{ald} \\ \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald} \\ -\cos \theta_i \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

Die richtungsbekannte Bewegung d lässt sich nach Formel (4-4) berechnen:

$$d = \frac{d_{LoS}}{-(\sin \theta_i \cdot \sin \alpha_{ald} \cdot d_{0,O} + \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald} \cdot d_{0,N} - \cos \theta_i \cdot d_{0,Z})} \quad (4-4)$$

In der Realität sind Betrag und Richtung einer wahren Bewegung meistens unbekannt, so dass die Ableitung des Winkels ϑ ohne weitere Annahmen, z. B. über ein Bewegungsmodell, nicht möglich ist.

In einem vereinfachten Bodenbewegungsmodell kann die Annahme gemacht werden, dass keine horizontale Bewegung stattfindet, bzw. die Horizontalbewegung vernachlässigbar ist. In diesem Fall verbleibt die vertikale Bewegungskomponente d_Z , also die Höhenänderung, als gesuchte Größe. Der Ansatz dieses Bodenbewegungsmodells, dass Horizontalbewegungen vernachlässigt werden können, wird dann zu realitätsnahen Ergebnissen führen, wenn die Blickrichtung des Sensors relativ steil nach unten gerichtet ist, da dann die LoS-Werte im Vergleich zu einer vertikalen Bewegung unempfindlich für horizontale Bewegungen sind (Kapitel 3.3.4).

Dieses vereinfachte Modell kommt sehr häufig bei der radarinterferometrischen Erfassung von durch anthropogene Ursachen induzierten Bodenbewegungen zur Anwendung. Im Hinblick auf die geometrische Bedeutung der Modellannahme kann der Bewegungsvektor durch den Einheitsvektor der gesuchten Bewegungsrichtung ausgedrückt werden, wodurch sich $\overrightarrow{d}_0 = (0 \quad 0 \quad 1)^T$ ergibt. Um die

Länge dieses vereinfachten Bewegungsvektors zu berechnen, wird \vec{d}_0 in Formel (4-4) eingesetzt und somit Formel (4-5) erhalten:

$$d_{Z,Modell} = \frac{d_{LoS}}{-(\sin \theta_i \cdot \sin \alpha_{ald} \cdot 0 + \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald} \cdot 0 - \cos \theta_i \cdot 1)} = \frac{d_{LoS}}{\cos \theta_i} \quad (4-5)$$

4.2.2 Systematische Abweichungen infolge der Modellannahme

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Modellannahme ermöglicht zwar die Berechnung der Höhenänderung, jedoch können die berechneten Ergebnisse möglicherweise fehlerbehaftet sein, wenn im Untersuchungsgebiet horizontale Bewegungen aufgetreten sind. Der durch die Modellannahme entstehende Abweichung $\Delta_{Z,1D}$ ist neben der Größe der horizontalen Bewegung überwiegend von der Aufnahmekonstellation und der Richtung der horizontalen Bewegung abhängig ist, wie durch Formel (4-6) wiedergegeben wird:

$$\begin{aligned} d_{Z,1D} &= d_{Z,wahr} - \Delta_{Z,1D} \\ &= \frac{d_{Z,wahr} \cdot \cos \theta_i - (d_{N,wahr} \cdot \cos \alpha_{ald} + d_{O,wahr} \cdot \sin \alpha_{ald}) \cdot \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \\ \Delta_{Z,1D} &= d_{Z,wahr} - \frac{d_{Z,wahr} \cdot \cos \theta_i - (d_{N,wahr} \cdot \cos \alpha_{ald} + d_{O,wahr} \cdot \sin \alpha_{ald}) \cdot \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \\ &= \frac{(d_{N,wahr} \cdot \cos \alpha_{ald} + d_{O,wahr} \cdot \sin \alpha_{ald}) \cdot \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \end{aligned} \quad (4-6)$$

Gleichung (4-6) lässt erkennen, dass die annahmebedingte Abweichung umso kleiner ist, je steiler der Einfallswinkel θ_i ist. Im Extremfall eines senkrecht auf die Erdoberfläche ausgerichteten Sensors ($\theta_i = 0$) wird diese Abweichung Null betragen. Bei einem Einfallswinkel verschieden von null spielt zusätzlich das Azimut $\alpha_{\vec{d}}$ der Horizontalbewegung eine wichtige Rolle. Durch die Angabe des Azimuts der Bewegung $\alpha_{\vec{d}}$ (Abbildung 18) lässt sich der Einheitsvektor einer horizontalen Bewegung als $(\sin \alpha_{\vec{d}} \quad \cos \alpha_{\vec{d}})^T$ schreiben, und damit die annahmebedingte Abweichung durch die Gleichung (4-7) berechnen.

$$\begin{aligned} \Delta_{Z,1D} &= \frac{d_{hor,wahr} \cdot (\cos \alpha_{\vec{d}} \cdot \cos \alpha_{ald} + \sin \alpha_{\vec{d}} \cdot \sin \alpha_{ald}) \cdot \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \\ &= \frac{d_{hor,wahr} \cdot \cos(\alpha_{\vec{d}} - \alpha_{ald}) \cdot \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \end{aligned} \quad (4-7)$$

Daraus lässt sich ableiten, dass die annahmebedingte Abweichung Null beträgt, wenn die Beziehung $\alpha_{\vec{d}} - \alpha_{ald} = \frac{\pi}{2} + 2N \cdot \pi, N \in (-1, 0, 1)$ gilt, d. h. die horizontale Bewegung orthogonal zur Blickrichtung erfolgt. Diese durch Horizontalbewegung verursachte Abweichung vergrößert sich mit abnehmenden Winkel zwischen der horizontalen Bewegung und der horizontalen Blickrichtung des

Sensors $\|\alpha_{\bar{d}} - \alpha_{ald}\|$ und erreicht sein Maximum, wenn die horizontale Bewegungsrichtung und die horizontale Blickrichtung des Sensors identisch sind, also $\alpha_{\bar{d}} - \alpha_{ald} = 2N \cdot \pi, N \in (-1, 0, 1)$. Bei diesem Fall stellt sich die annahmebedingte systematische Abweichung als die Multiplikation der tatsächlichen Horizontalbewegung in der horizontalen Blickrichtung des Sensors und der Tangenswerte des Einfallswinkels (4-8) dar.

$$\Delta_{Z,1D,max} = \tan \theta_i \cdot d_{hor,wahr} \quad (4-8)$$

In Falle des bei Sentinel-1 häufig verfügbaren Wertbereichs des Einfallswinkels von 30° bis 45° kann der konstellationsbedingte Multiplikator einen Wert von 0,58 bis 1 aufweisen.

In Abbildung 26 ist die auf die horizontale Blickrichtung des Sensors projizierte Horizontalbewegung (blaue und rote Pfeile) in Abhängigkeit vom Azimut der horizontalen Bewegung dargestellt. Die schwarzen Pfeile zeigen modellhaft die Richtung sowie den als gleich groß angenommen Betrag der horizontalen Bewegungen. Die durch die horizontalen Bewegungen entstandene Abweichung in der abgeleiteten Höhenänderung ist proportional zu der auf die horizontale Blickrichtung des Sensors projizierten Horizontalbewegung.

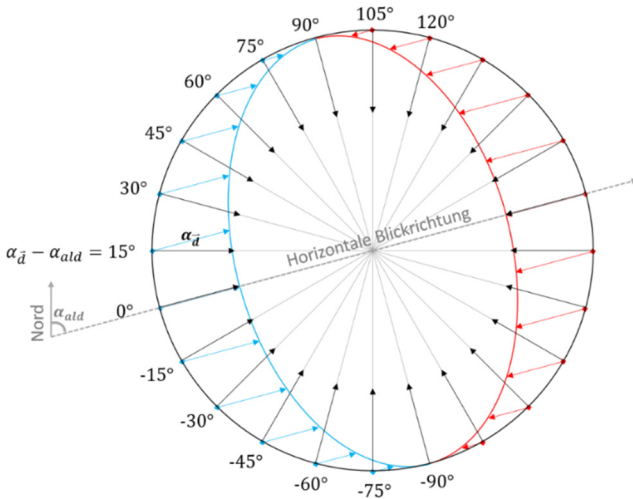
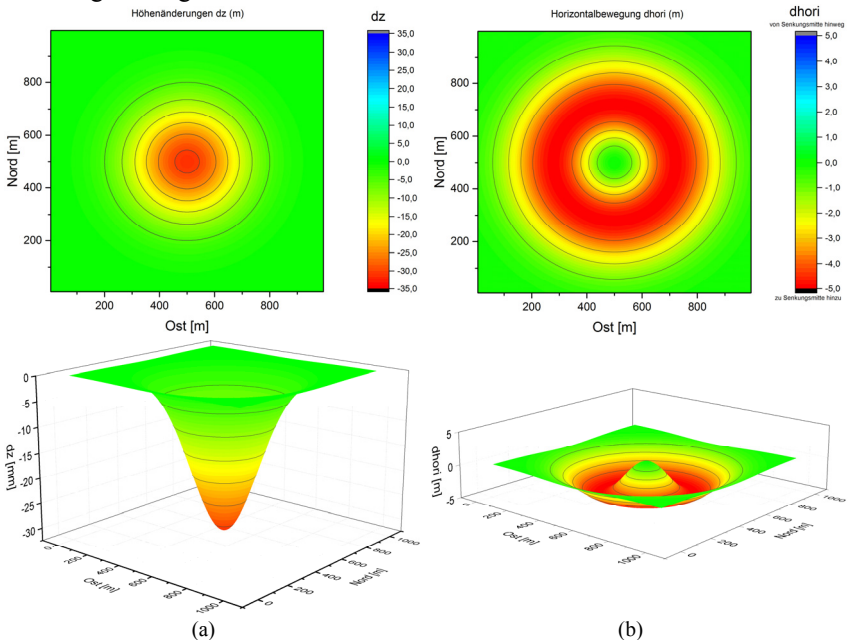


Abbildung 26: Schematische Darstellung der horizontalbewegungsbedingten Abweichung. Schwarze Pfeile: Vektoren der Horizontalbewegungen mit gleicher Länge; Blaue und rote Pfeile: auf der horizontalen Blickrichtung des Sensors projizierte Horizontalbewegungen.

Für die Übertragung dieser Darstellung in die Praxis ist zu beachten, dass die annahmebedingte systematische Abweichung $\Delta_{Z,1D}$ bei den blauen Pfeilen in Abbildung 26 ein negatives Vorzeichen und bei den roten Pfeilen ein positives

Vorzeichen besitzt. Somit wird z. B. eine Senkung infolge der vernachlässigten horizontalen Bewegungen im Fall der blauen Pfeile überschätzt und im Bereich der roten Pfeile unterschätzt.

Diese hier theoretisch abgeleitete Abweichung ist auch, wie z. B. in Samieie-Esfahany et al. (2009) und Busch et al. (2016) gezeigt, bei der Ermittlung von Höhenänderungen in konkreten Anwendungsfällen durch die Vernachlässigung von horizontalen Bewegungen aufgetreten, und hat zu falschen Interpretationen von radarinterferometrischen Auswertungen geführt. Im Folgenden sollen deshalb exemplarisch für eine modellhafte Situation die Auswirkungen der annahmebedingten Abweichung, welche bei der projizierenden Berechnung mittels einer einzelnen Aufnahmegeometrie systematisch auftritt, mit Hilfe eines realitätsnahen Bodenbewegungsmodells nach Schober (1982) (siehe Anhang I) simuliert werden. In Abbildung 27 sind die Bodenbewegungskomponenten d_z, d_{hor}, d_o, d_N dieses Senkungsmodells bezüglich der horizontalen Ebene in einem zweidimensionalen Koordinatensystem dargestellt (jeweils die oberen Darstellungen in Abbildung 27 a bis d), wobei die Größen der einzelnen Bodenbewegungskomponenten durch die Farbskalen wiedergegeben werden. Zur Verbesserung des Verständnisses sind die entsprechenden dreidimensionalen Modelle der jeweiligen Bewegungskomponenten in den jeweils unteren Grafiken in Abbildung 27 dargestellt.



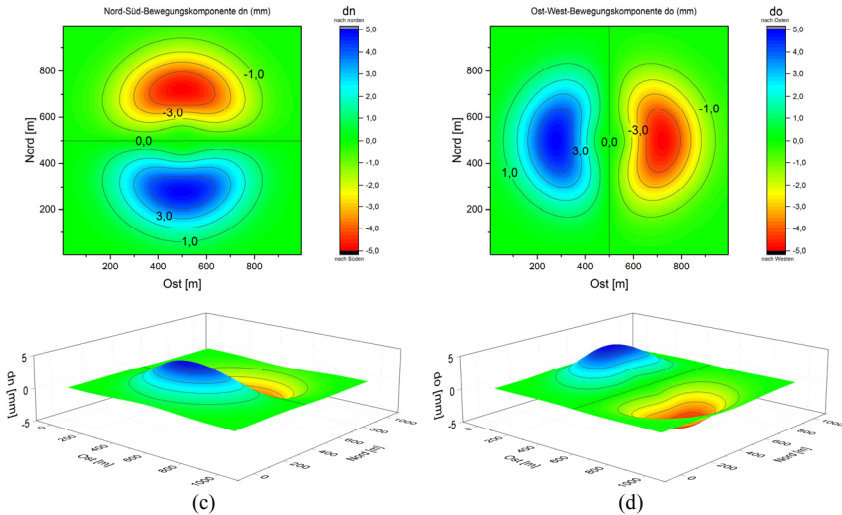


Abbildung 27: Simulierte Senkungsmulde mit ihren Bewegungskomponenten gemäß einem Bewegungsmodell für Kavernen nach Schober (1982)

Dieses Modell kann für die Senkungsvorausberechnung einer zylinderförmigen Kaverne, welche über die Tiefe konstantes Konvergenzverhalten aufweist, angewendet werden. Die Summe der Bewegungskomponenten jedes Punktes auf der Erdoberfläche zeigt zur Senkungsmitte, während die Größenordnung der Horizontalbewegungen von der Schiefelage und dem Abstand zur Senkungsmitte abhängig ist.

Aus den so durch Simulation bestimmten dreidimensionalen Bodenbewegungskomponenten können mittels der Formel (3-28) entsprechende „simulierte“ LoS-Werte für die Ascending- und die Descending-Blickrichtung berechnet werden. Diese Berechnungen erfolgten mit einem Einfallswinkel von jeweils 40° für die beiden Aufnahmerichtungen, während für das Azimut der horizontalen Blickrichtung der Ascending-Aufnahme ein Winkel von $80,39^\circ$ und der Descending-Aufnahme von $-80,14^\circ$ gewählt wurde. Die so für beide Aufnahmerichtungen abgeleiteten LoS-Bewegungen sind in Abbildung 28 mit derselben Farbskalierung wie die der Höhenänderung in Abbildung 27 dargestellt.

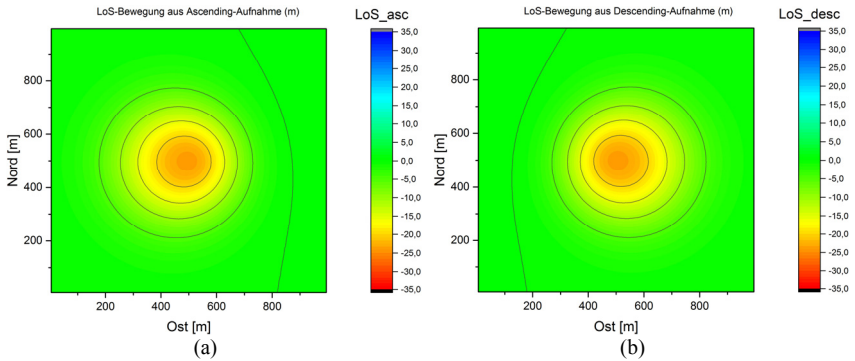


Abbildung 28: LoS-Bewegung der simulierten Senkungsmulde mit der Konstellation $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 40^\circ$ für die beiden Aufnahmeerichtungen und die Azimute der Blickrichtungen der Ascending-Aufnahme $80,39^\circ$ und der Descending-Aufnahmen $-80,14^\circ$

Die nach der Formel (4-5) aus den simulierten LoS-Daten abgeleiteten Höhenänderungen und die dabei entstandenen annahmebedingten Abweichungen sind in Abbildung 29 dargestellt.

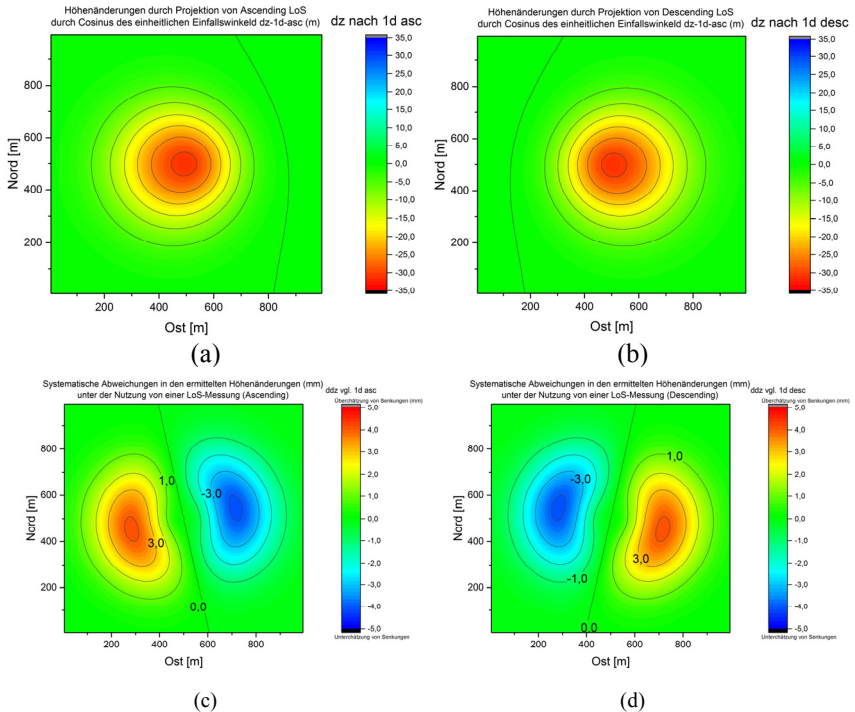


Abbildung 29: Darstellung der aus Einzelaufnahmegeometrie ermittelten Höhenänderung und der Abweichung zur wahren Höhenänderung

Ein Vergleich zwischen der Abbildung 27a und der Abbildung 29a bzw. Abbildung 29b ergibt, dass die radarinterferometrisch abgeleiteten Senkungsbereiche untereinander und gegenüber dem vorausberechneten Senkungsbereich lagemäßig versetzt sind. Der mittels der Ascending-Aufnahmegeometrie bestimmte Senkungsbereich ist mehr nach Westen bzw. Südwesten ausgedehnt, und der der Descending-Aufnahmerichtung mehr nach Osten bzw. Südosten versetzt. Die annahmebedingte systematische Abweichung $\Delta_{Z,1D}$, der die Differenz zwischen der ursprünglichen und den durch eindimensionale LoS-Messung ermittelten Höhenänderungen beschreibt, ist für die Ascending- und Descending-Auswertungen jeweils in Abbildung 29c und d dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die ohne Berücksichtigung von Horizontalbewegungen abgeleiteten Höhenänderungen auf der dem Sensor zugewandten Seite des Bewegungsgebietes eine Überschätzung (rote Bereiche in Abbildung 29c und d) gegenüber den wahren (simulierten) Höhenänderungen erfahren. Im Gegensatz hierzu tritt eine Unterschätzung (blaue Bereiche in Abbildung 29c und d) der Höhenänderungen auf der dem Sensor abgewandten Seite des Bewegungsgebietes auf. Andererseits bestätigt sich aber auch, dass dieser Fehler gegen Null geht, wenn die Richtung der Horizontalbewegung orthogonal zur jeweiligen horizontalen Blickrichtung des Sensors verläuft.

Die durch die annahmebedingte systematische Abweichung entstandenen Unter- und Überschätzungen in den abgeleiteten Höhenänderungen zeigen sich auch in den Ost-West-Profilen in Abbildung 30, in denen die Höhenänderungsprofile der simulierten (schwarze Punkte und Linie in Abbildung 30) und den aus einer Aufnahme-richtung durch Projektion ermittelten (rote Farbe für Ascending, blau für Descending) Senkungsmulden gegenübergestellt sind. In der Mitte der Senkungsmulde überschneiden sich die beiden Senkungsprofilkurven, denn dort ist (theoretisch) keine Horizontalbewegung aufgetreten.

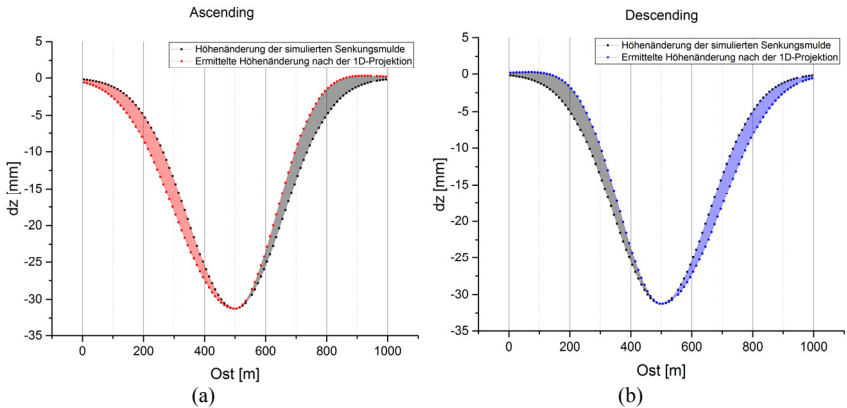


Abbildung 30: Senkungsprofil der wahren Höhenänderung und der aus Einzelgeometrie ermittelten Höhenänderung aus (a) Ascending und (b) Descending

Je nach der Ausrichtung des Profils pures verändert sich die Größenordnung der Unter- und Überschätzung (siehe auch Abbildung 26). Die simulierten und ermittelten Mulden stimmen miteinander überein, nur wenn der Profils pur senkrecht zur horizontalen Blickrichtung des Sensors steht.

4.3 Bestimmung von Bodenbewegungen mittels der kombinatorischen Berechnung mit zwei sich kreuzenden Tracks

Die kombinatorische Berechnung von Bodenbewegungskomponenten setzt voraus, dass zwei sich kreuzende Aufnahmetracks (LoS-Datensätze) (Abbildung 13) für einen gemeinsamen Zeitraum vorliegen. Hierzu wird auf Daten von SAR-Satelliten zurückgegriffen, die eine polarnähe Umlaufbahn besitzen (siehe Kapitel 3.1.2). Die Aufnahmezeitpunkte der zwei Blickrichtungen sind zeitlich versetzt, jedoch ist der zeitliche Versatz kleiner als der Wiederholungszyklus des Sensors. Somit bietet sich eine erweiterte Lösung zur Ermittlung von Bodenbewegungskomponenten, indem man LoS-Bewegungen eines Gebietes aus zeitlich überlappenden Ascending- und Descending-Aufnahmen kombiniert und somit die Bewegungskomponente in Ost-West-Richtung und Höhenänderung abgeleitet werden können.

4.3.1 Funktionaler Zusammenhang

Die Ausgangssituation der kombinatorischen Berechnung stellen zwei LoS-Messungen dar, die jeweils durch Ascending- und Descending-Aufnahmegeometrie entstanden sind. Entsprechend der allgemeinen Schreibweise eines linearen Gleichungssystems zur Bestimmung der drei Bodenbewegungskomponenten ergibt sich für jeden zu ermittelnden Messpunkt das folgende unterbestimmte LGS (4-9).

$$\begin{matrix} \mathbf{A} & \cdot & \mathbf{x} & = & \mathbf{b} \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\sin \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,A} & -\sin \theta_{i,A} \cdot \cos \alpha_{ald,A} & \cos \theta_{i,A} \\ -\sin \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,D} & -\sin \theta_{i,D} \cdot \cos \alpha_{ald,D} & \cos \theta_{i,D} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_O \\ d_N \\ d_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{LoS,A} \\ d_{LoS,D} \end{pmatrix} \quad (4-9)$$

In diesen Gleichungen kann man den Einfallswinkel und das Azimut der Blickrichtungen als bekannte Größen und damit als Konstante betrachten. Mit Hilfe der nachfolgenden Verabredungen kann man das obige Gleichungssystem umschreiben in:

$$\begin{matrix} \mathbf{A} & \cdot & \mathbf{x} & = & \mathbf{b} \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} a_{O,A} & a_{N,A} & a_{Z,A} \\ a_{O,D} & a_{N,D} & a_{Z,D} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_O \\ d_N \\ d_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{LoS,A} \\ d_{LoS,D} \end{pmatrix} \quad (4-10)$$

Hierbei gelten die folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} a_{O,A} &= -\sin \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,A} \\ a_{N,A} &= -\sin \theta_{i,A} \cdot \cos \alpha_{ald,A} \\ a_{Z,A} &= \cos \theta_{i,A} \\ a_{O,D} &= -\sin \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,D} \\ a_{N,D} &= -\sin \theta_{i,D} \cdot \cos \alpha_{ald,D} \\ a_{Z,D} &= \cos \theta_{i,D} \end{aligned} \quad (4-11)$$

Eine Auflösung dieses Gleichungssystems ist nur unter Annahmen möglich.

Bevor die mathematischen Ableitungen der einzelnen Bewegungskomponenten mittels der Ascending- und Descending-Aufnahmegeometrie durchgeführt werden, soll auf die geometrischen Zusammenhänge der beiden Aufnahmegeometrien eingegangen werden. In Kapitel 3.3 wurden die beiden Aufnahmegeometrien bereits durch Abbildung 13 in einem dreidimensionalen Koordinatensystem zusammen dargestellt. Um den geometrischen Zusammenhang zwischen den beiden Aufnahmerichtungen besser zu erläutern, sind die Blicklinien in Abbildung 31 jeweils auf die Fläche Nord-Ost (horizontal, Abbildung 31a) und

Zenit-Ost (vertikal, Abbildung 31b) projiziert dargestellt. Hierbei sind das Azimut der horizontalen Blickrichtung und die Projektion des Einfallswinkels auf die Zenit-Ost-Ebene θ_i^* die zwei wichtigen Winkel für jede Aufnahmerichtung.

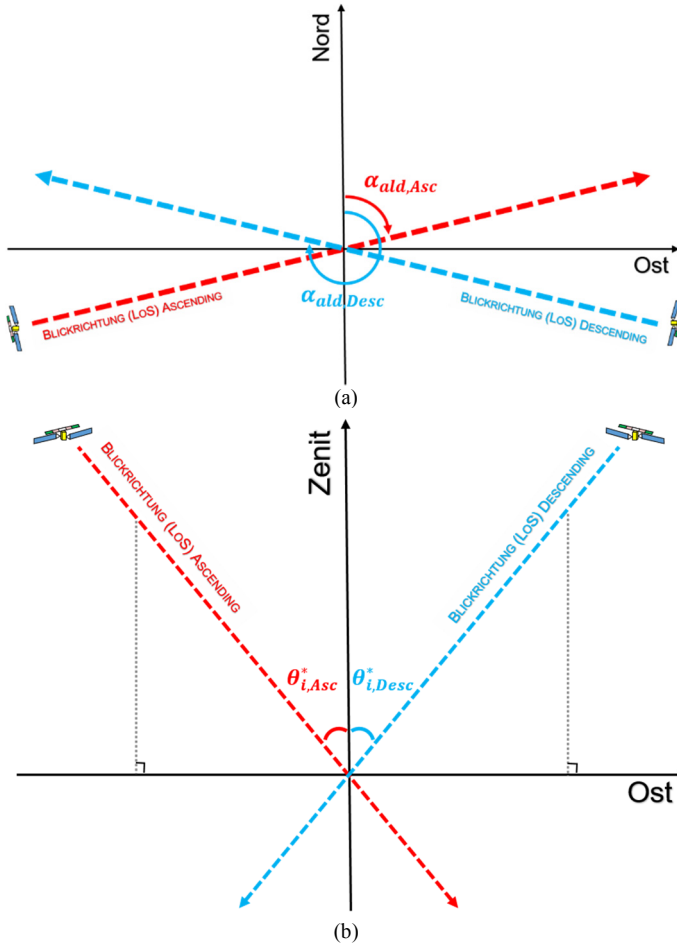


Abbildung 31: Perspektive der Blicklinie von Ascending- und Descending-Aufnahmen in (a) NO-Fläche (horizontal) und (b) ZO-Fläche (vertikal)

Beide Abbildungen ermöglichen ein besseres Verständnis für die Messwertänderungen, da z. B. ein reines Senkungsverhalten in beiden Aufnahmerichtungen als eine „Abstandvergrößerung“ gemessen werden würde (vgl. Abbildung 31b¹).

¹ In Abbildung 31b werden die Einfallswinkel auf der Zenit-Ost-Ebene von Ascending und Descending als θ_i^* bezeichnet. Dieser Winkel ist nicht gleich dem Einfallswinkel θ_i , welcher sich auf die Fläche von der vertikalen Richtung und der Blickrichtung bezieht.

Eine horizontale Bewegung nach Norden ergäbe auch eine Abstandvergrößerung (vgl. Abbildung 31a). Dagegen würde eine Bewegung in Ost-West-Richtung bei den Ascending- und Descending-Aufnahmen durch Messwertänderungen mit unterschiedlichem Vorzeichen führen. Eine Bewegung nach Osten ergäbe für die Ascending-Aufnahme eine „Abstandsvergrößerung“ und für die Descending-Aufnahme eine „Abstandsverkürzung“.

Somit kann festgestellt werden, dass sich eine Bewegung in Ost-West-Richtung durch unterschiedliche Vorzeichen in den Blicklinien der Ascending- und Descending-Aufnahmen widerspiegelt, während eine Höhenänderung und eine Nord-Süd-Bewegungskomponente sich jeweils mit demselben Vorzeichen auf den Ascending- und Descending-Blicklinien abbildet. Diese Feststellung kann für einen ersten Lösungsweg zur Bestimmung einer Ost-West-Bewegungskomponente und Höhenänderung genutzt werden, indem die folgenden drei Annahmen getroffen werden:

- (1) $\alpha_{ald,A} \approx 2\pi - \alpha_{ald,D} = \alpha_{ald}$
- (2) $\theta_{i,A} \approx \theta_{i,D} = \theta_i$
- (3) $-\sin \theta_{i,A} \cdot \cos \alpha_{ald,A} \cdot d_N \approx -\sin \theta_{i,D} \cdot \cos \alpha_{ald,D} \cdot d_N \approx 0$

Aus den ersten zwei Annahmen ergibt sich die Ost-West-Bewegungskomponente aus den folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned}
 & d_{LoS,Desc} - d_{LoS,Asc} \\
 &= \begin{pmatrix} -\sin \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,D} + \sin \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,A} \\ -\sin \theta_{i,D} \cdot \cos \alpha_{ald,D} + \sin \theta_{i,A} \cdot \cos \alpha_{ald,A} \\ \cos \theta_{i,D} - \cos \theta_{i,A} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_O \\ d_N \\ d_Z \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -\sin \theta_i \cdot (-\sin \alpha_{ald}) + \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_{ald} \\ -\sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald} + \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald} \\ \cos \theta_i - \cos \theta_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_O \\ d_N \\ d_Z \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_{ald} + \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_{ald} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_O \\ d_N \\ d_Z \end{pmatrix} \\
 & d_O = \frac{d_{LoS,Desc} - d_{LoS,Asc}}{2 \cdot \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_{ald}} \tag{4-12}
 \end{aligned}$$

Die dritte Annahme ergibt sich durch die Unempfindlichkeit der LoS-Messung gegenüber einer Nord-Süd-Bewegungskomponente. Unter der Bedingung, dass $\frac{\pi}{2} - \alpha_{ald}$ ein kleiner Winkel ist, und damit der Wert von $\cos \alpha_{ald} \approx 0$ bzw. somit der Einfluss der Bewegung in Nord-Süd-Richtung ($d_N \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald}$) vernachlässigt werden kann, lässt sich die Höhenänderung d_Z durch die Formel (4-13) berechnen.

$$\begin{aligned}
d_{LoS,Desc} + d_{LoS,Asc} &= \begin{pmatrix} d_o \\ d_N \\ d_Z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald} \\ 2 \cdot \cos \theta_i \end{pmatrix} \\
&= -d_N \cdot 2 \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald} + d_Z \cdot 2 \cdot \cos \theta_i \\
d_Z &= \frac{d_{LoS,Desc} + d_{LoS,Asc}}{2 \cdot \cos \theta_i}
\end{aligned} \tag{4-13}$$

Dieselben Annahmen wurden auch in den Anwendungsbeispielen in Refice et al. (2016), Haghighi & Motagh (2017) u. Yin & Busch (2018) verwendet.

Die Plausibilität der drei Annahmen, die beim obengenannten Ansatz getroffen werden, lässt sich offensichtlich nur in besonderen Fällen bestätigen. Die erste Annahme über die Azimute der Blickrichtungen dürfte bei der Nutzung eines einzelnen Sensors kaum von der Realität abweichen. Dagegen kann insbesondere die zweite Annahme bezüglich der Einfallswinkel von einer realen Situation abweichen. Allerdings ergibt sich durch die vertiefende Betrachtung der drei obengenannten Annahmen ein weiterer Lösungsweg zur Ermittlung der Höhenänderung und der Ost-West-Komponente, bei dem die Einfallswinkel und die Azimute der Ascending- und Descending-Aufnahmen jeweils nicht mehr als gleich betrachtet werden müssen. Um das Gleichungssystem lösbar zu machen, wird dazu der Term der sensorunempfindlichen Nord-Süd-Komponente zur Reduktion der Anzahl der Unbekannten zu Null gesetzt.

$$\begin{pmatrix} a_{o,A} & a_{z,A} \\ a_{o,D} & a_{z,D} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_o \\ d_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{LoS,A} \\ d_{LoS,D} \end{pmatrix} \tag{4-14}$$

Die Lösungen für d_o und d_Z ergeben sich jeweils durch Formeln (4-15) und (4-16).

$$d_o = \frac{a_{z,D} \cdot d_{LoS,A} - a_{z,A} \cdot d_{LoS,D}}{a_{o,A} \cdot a_{z,D} - a_{o,D} \cdot a_{z,A}} \tag{4-15}$$

$$d_Z = \frac{a_{o,D} \cdot d_{LoS,A} - a_{o,A} \cdot d_{LoS,D}}{a_{z,A} \cdot a_{o,D} - a_{z,D} \cdot a_{o,A}} \tag{4-16}$$

Im folgenden Kapitel wird für die beiden oben genannten Ansätze auf die systematischen Abweichungen, die durch die Modellannahmen entstehen können, eingegangen.

4.3.2 Systematische Abweichung infolge der Modellannahme

Anders als bei der Bestimmung von Höhenänderungen mit einer einzelnen LoS-Messung, basieren die in Kapitel 4.3 vorgestellten Ansätze nicht auf der kompletten Vernachlässigung der Horizontalbewegung, sondern „nur“ der Vernachlässigung der sensorunempfindlichen Nord-Süd-Bewegungskomponente. Durch

die Formeln (4-15) und (4-16) wird ein allgemeiner Weg zur kombinatorischen Berechnung beschrieben, während die Formeln (4-12) und (4-13) für einen Sonderfall der Aufnahmekonstellation zutreffen.

Durch die allgemeine Lösung der kombinatorischen Berechnung entsteht eine annahmebedingte, systematische Abweichung aufgrund der Vernachlässigung der Nord-Süd-Bewegungskomponente. Diese Abweichung kann direkt durch die Formeln (4-15) und (4-16) ähnlich dem Ansatz mittels für die Einzelaufnahmegometrie abgeleitet werden:

$$\begin{aligned}
 d_{Z,2D} &= d_{Z,wahr} - \Delta_{Z,2D} = \frac{a_{O,D} \cdot d_{LoS,A} - a_{O,A} \cdot d_{LoS,D}}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}} \\
 \Delta_{Z,2D} &= d_{Z,wahr} - d_{Z,2D} = d_{Z,wahr} - \frac{a_{O,D} \cdot d_{LoS,A} - a_{O,A} \cdot d_{LoS,D}}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}} \\
 &= \frac{(a_{O,A} \cdot a_{N,D} - a_{O,D} \cdot a_{N,A}) \cdot d_{N,wahr}}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}} \\
 &= \frac{\sin \theta_{i,D} \cdot \sin \theta_{i,A} \cdot \sin(\alpha_{ald,A} - \alpha_{ald,D})}{\cos \theta_{i,D} \cdot \sin \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,A} - \cos \theta_{i,A} \cdot \sin \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,D}} \cdot d_{N,wahr} \\
 &= \frac{\sin(\alpha_{ald,A} - \alpha_{ald,D})}{\cot \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,A} - \cot \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,D}} \cdot d_{N,wahr} \tag{4-17}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_{O,2D} &= d_{O,wahr} - \Delta_{O,2D} = \frac{a_{Z,D} \cdot d_{LoS,A} - a_{Z,A} \cdot d_{LoS,D}}{a_{O,A} \cdot a_{Z,D} - a_{O,D} \cdot a_{Z,A}} \\
 \Delta_{O,2D} &= d_{O,wahr} - d_{O,2D} = d_{O,wahr} - \frac{a_{Z,D} \cdot d_{LoS,A} - a_{Z,A} \cdot d_{LoS,D}}{a_{O,A} \cdot a_{Z,D} - a_{O,D} \cdot a_{Z,A}} \\
 &= \frac{(a_{Z,A} \cdot a_{N,D} - a_{Z,D} \cdot a_{N,A}) \cdot d_{N,wahr}}{a_{O,A} \cdot a_{Z,D} - a_{O,D} \cdot a_{Z,A}} \\
 &= \frac{\cos \theta_{i,A} \cdot \sin \theta_{i,D} \cdot \cos \alpha_{ald,D} - \cos \theta_{i,D} \cdot \sin \theta_{i,A} \cdot \cos \alpha_{ald,A}}{\sin \theta_{i,A} \cdot \cos \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,A} - \sin \theta_{i,D} \cdot \cos \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,D}} \cdot d_{N,wahr} \\
 &= \frac{\tan \theta_{i,D} \cdot \cos \alpha_{ald,D} - \tan \theta_{i,A} \cdot \cos \alpha_{ald,A}}{\tan \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,A} - \tan \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,D}} \cdot d_{N,wahr} \tag{4-18}
 \end{aligned}$$

Dabei bedeutet $d_{N,wahr}$ die tatsächliche Nord-Süd-Bewegungskomponente. Aus den Formeln (4-17) und (4-18) ist erkennbar, dass die systematische, annahmebedingte Abweichung in der kombinatorisch berechneten Höhenänderung und der Ost-West-Bewegungskomponente vor allem linear von der Nord-Süd-Bewegungskomponente abhängt. Die vernachlässigte Nord-Süd-Bewegungskomponente geht nicht mit der ursprünglichen Größe in die ermittelte Höhenänderung und Ost-West-Bewegung ein, sondern jeweils mit einem Faktor, welcher von den Einfallswinkeln und den Azimuten der Blickrichtungen bestimmt wird. Dieser Faktor wird in der weiteren Untersuchung als ε -Faktor bezeichnet. Rechnerisch können sie gemäß den Formeln (4-19) und (4-20) ermittelt werden.

$$\varepsilon_Z = \frac{\sin(\alpha_{ald,A} - \alpha_{ald,D})}{\cot \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,A} - \cot \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,D}} \tag{4-19}$$

$$\varepsilon_o = \frac{\tan \theta_{i,D} \cdot \cos \alpha_{ald,D} - \tan \theta_{i,A} \cdot \cos \alpha_{ald,A}}{\tan \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,A} - \tan \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,D}} \quad (4-20)$$

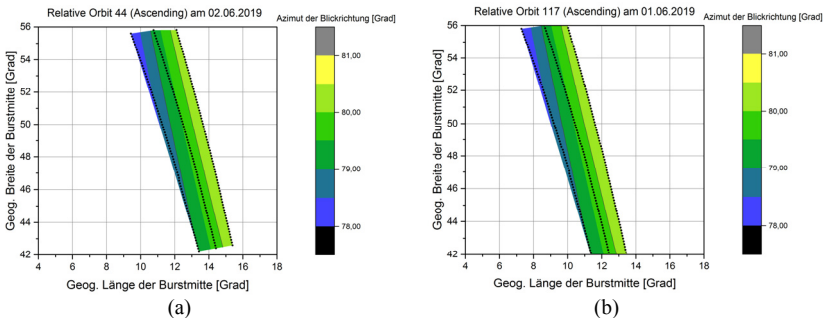
Um die Größenordnung und Auswirkung dieser systematischen Abweichung zu untersuchen, wird er in den folgenden Absätzen unter zwei Aspekten diskutiert: konstellationsbedingte Winkel und Nord-Süd-Bewegungskomponente.

4.3.2.1 Auswirkung der konstellationsbedingten Winkel

Vor einer Diskussion über den Einfluss der konstellationsbedingten Winkel sollen zunächst die Wertebereiche des Azimuts der Blickrichtung und des Einfallswinkels, jeweils für Ascending- und Descending-Aufnahmen, betrachtet und berechnet werden.

Das Azimut der Blickrichtung α_{ald} ist abhängig vom Satellitenorbit und der Blickrichtung des Sensors, wobei bei Sentinel-1, bzw. den meisten SAR-Sensoren, der Sensor orthogonal zur Flugrichtung nach rechts blickt. Durch die feste Inklination der Bahnebene beträgt das Azimut der Blickrichtung in Allgemein ca. 80° bei Ascending und $2\pi - 80^\circ$ bei Descending. Diese Winkel können bei den breiten Aufnahmebereichen von Sentinel-1, welche in drei Teilstreifen aufgeteilt sind, von Teilstreifen zu Teilstreifen leicht variieren.

Um diesen Unterschied zu veranschaulichen wird das Azimut der Blickrichtung beispielhaft für 4 Tracks nach der in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Formel (3-21) berechnet. Als Beispiel werden von Ascending- und Descending-Aufnahmen jeweils 2 Tracks ausgewählt, die jeweils aus 9 – 10 Szenen bestehen und sich über Mitteleuropa in Nord-Süd-Richtung erstrecken. Die Eckkoordinaten jedes Bursts werden aus den Metadaten der Szenen entnommen. In Abbildung 32 sind die Azimute der Blickrichtung für die 4 ausgewählten Tracks in a bis d dargestellt, wobei das Azimut für jeden Burst ermittelt und grafisch als Farbgradient dargestellt wurde. Die schwarzen Punkte in Abbildung 32 indizieren die Burstmittelpunkte der jeweiligen Aufnahmestreifen (Subswaths).



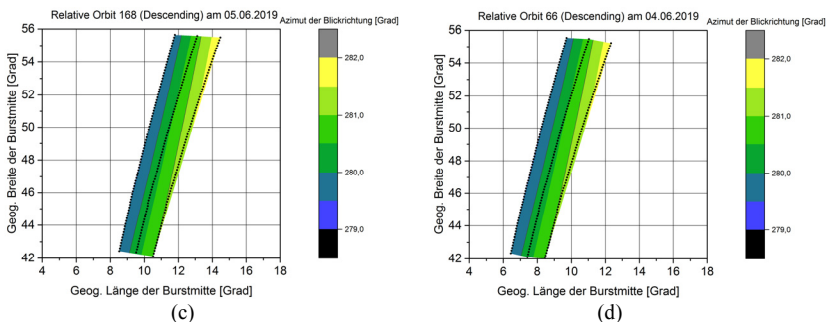


Abbildung 32: Azimute der Blickrichtungen bei Sentinel-1 in Abhängigkeit vom Abstand zum Sensor und der geographischen Positionen

Durch die Grafiken lässt sich der Wertebereich des Azimuts der Blickwinkel von ca. 78° bis 81° für Ascending und 279° bis 282° für Descending erkennen. Die Größenordnung dieses Winkels hängt zunächst vom Abstand zwischen Burst und Sensor ab, während sich gleichzeitig die geographische Breite der Aufnahme auswirkt. Am Beispiel von Ascending-Aufnahmen in Abbildung 32 besitzen die Bursts in den sensornahen Teilstreifen kleinere Azimute der Blickrichtung, d. h. weniger Abweichung zur geographischen Nord-Richtung, während die Bursts auf der sensorabgewandten Seite bis zu 3° mehr von der dort gültigen geographischen Nord-Richtung abweichen kann. Je nördlicher sich die Aufnahmen befinden, umso größer wird der Winkelunterschied zwischen den sensornahen und sensorentfernten Bursts.

Wie zu Beginn dieses Unterkapitels erwähnt, soll nun auch der Wertebereich des Einfallswinkels verdeutlicht werden. Der Einfallswinkel θ_i kann aufgrund seiner physikalischen Bedeutung bzgl. der geometrischen Optik in einem Wertebereich von 0° bis kleiner als $\frac{\pi}{2}$ liegen. Ein Einfallswinkel mit 0° bedeutet, dass der Radarstrahl den Rückstreuer in Nadirrichtung trifft. Dementsprechend liegt der Wert seiner Tangensfunktion $\tan \theta_i$ im Bereich von 0 bis $+\infty$. Der Tangenswert steigt mit zunehmendem Einfallswinkel, d. h. in der Praxis verläuft der Radarstrahl immer flacher. Der Kotangens nimmt zwar auch Werte von 0 bis $+\infty$, an, aber, im Gegensatz zum Tangens, nehmen seine Werte mit steigendem Einfallswinkel ab. Für Radaraufnahmen der Sentinel-1 Mission kann sich der mittlere Einfallswinkel je nach Teilstreifen und der Orbit-Höhe in den Wertebereichen befinden, die in Tabelle 3 gemäß Angaben der ESA aufgelistet sind.

Tabelle 3: Offizielle Angaben des mittleren Einfallswinkels von Sentinel-1 bezogen auf den jeweiligen Aufnahmestreifen (European Space Agency, 2019b)

| | IW1 | IW2 | IW3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Einfallswinkel an der minimalen Orbit-Höhe (°) | 30,86-36,59 | 36,47-41,85 | 41,75-46,00 |
| Einfallswinkel an der maximalen Orbit-Höhe (°) | 29,16-34,89 | 34,77-40,15 | 40,04-44,28 |

Laut dieser Angabe ist der Einfallswinkel überwiegend abhängig vom Abstand zum Sensor in der Blickrichtung. Innerhalb einer kompletten Szene kann der Einfallswinkel der sensorzugewandten Seite bereits ca. 15° kleiner als der der sensorabgewandten Seite sein. Die räumliche Verteilung des ellipsoidischen Einfallswinkels bezüglich des WGS84 sind beispielhaft für 2 Tracks in Abbildung 33 dargestellt.

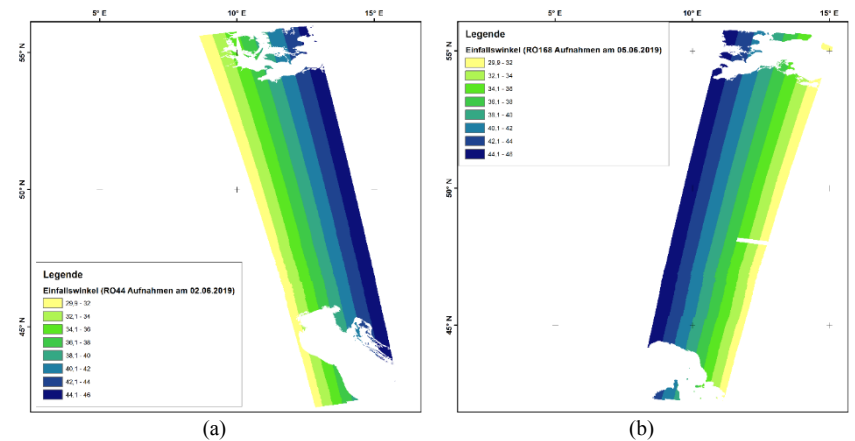


Abbildung 33: Einfallswinkel bei Sentinel-1 in Abhängigkeit vom Abstand zum Sensor und der geographischen Positionen

In den Grafiken lässt sich eine ähnliche Eigenschaft wie für das Azimut der Blickrichtung erkennen, nämlich, dass die Größenordnung dieses Winkels von dem Abstand zwischen Burst und Sensor sowie von der geographischen Breite der Aufnahme abhängt. Am Beispiel von Ascending-Aufnahmen in Abbildung 33 besitzen die Bursts in den sensornahen Teilstreifen kleinere Einfallswinkel, d. h. die Blicklinie trifft steiler auf den Aufnahmeort auf, während die Bursts auf der sensorabgewandten Seite ein Einfallswinkel bis 45° aufweisen. Zudem gilt auch hier, dass je nördlicher sich die Aufnahmen befinden, umso größer wird der Winkelunterschied zwischen den sensornahen und sensorentfernten Bursts.

Um den Einfluss der Winkel auf die resultierende systematische Abweichung zu analysieren, ist nicht nur die Größenordnung des Winkels selbst wichtig, sondern es spielt auch die Differenz zwischen denselben Winkeln aus den zu kombinierenden Ascending- und Descending-Aufnahmen eine große Rolle. Diese beiden Aspekte werden in den weiterführenden Untersuchungen verfolgt, und eine entstehende systematische Abweichung wird anhand des Bodenbewegungsmodells, welches auch in Kapitel 4.2 verwendet wurde, für verschiedene Winkelbedingungen ermittelt.

❖ EINFLUSS DER GRÖÖE DES AZIMUTS DER BLICKRICHTUNG

Zunächst ist die Auswirkung von verschiedenen Größen des Azimuts zu testen, indem die entsprechenden Einfallswinkel und Azimute von Ascending- und Descending-Aufnahmen gleichgesetzt werden. Dazu wird der Wert der Einfallswinkel beispielhaft auf 40° eingestellt, und die Azimute der Blickrichtung werden jeweils mit 78° und 81° getestet. Die nach Formel (4-15) und (4-16) kombinatorisch berechneten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponenten, bzw. die entsprechend nach Formel (4-17) und (4-18) ermittelten systematischen Abweichungen sind in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellt.

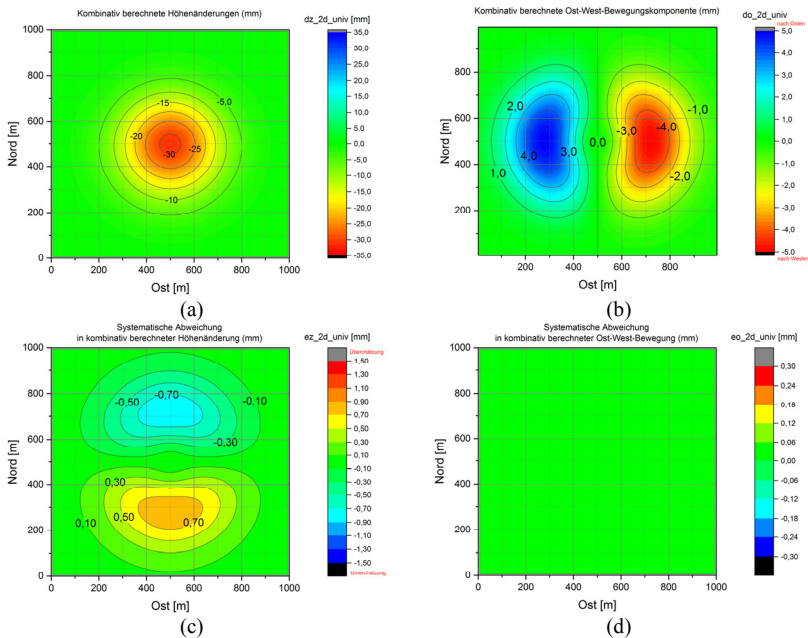
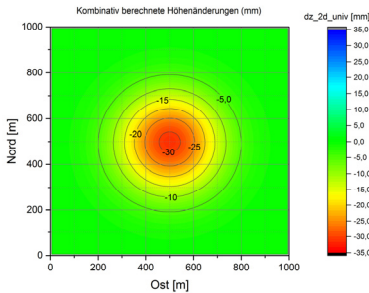


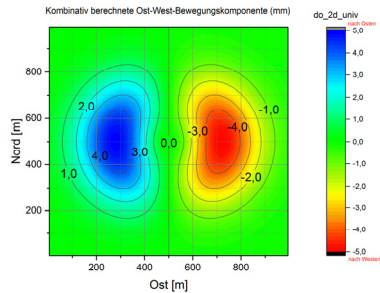
Abbildung 34: Kombinatorisch berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 40^\circ$, $\alpha_{ald,A} = 78^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 78^\circ$.

In Abbildung 34d ist zu erkennen, dass die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente null ist, wenn die Einfallswinkel von Ascending und Descending gleich sind, und die Azimute einen gleichen Betrag der Abweichung zur Nordrichtung aber mit umgekehrten Vorzeichen aufweisen. Bei einer solchen Konstellation gilt nämlich $\tan \theta_{i,D} \cdot \cos \alpha_{ald,D} = \tan \theta_{i,A} \cdot \cos \alpha_{ald,A}$, und somit ist $\Delta_{O,2D}$ null. Dieser Zusammenhang wird auch durch das Ergebnis in Abbildung 35d unterstützt.

Im Gegensatz zur Ost-West-Bewegungskomponente enthält die ermittelte Höhenänderung noch systematische Abweichungen. Im Allgemeinen zeigen sich diese infolge der durch die Annahme vernachlässigten Nord-Süd-Bewegungskomponente in Form einer Unterschätzung und einer Überschätzung. Im Falle dieser Simulation bewegt sich der nördliche Teil der Senkungsmulde auf der Nord-Süd-Achse nach Süden zum Senkungsschwerpunkt. Dies führt zu einer Abstandverkürzung zwischen Objekt und Sensor. Bei Vernachlässigung der Nord-Süd-Bewegungskomponente wird sich diese Horizontalbewegung im nördlichen Teil der Senkungsmulde als eine Unterschätzung auswirken, und im südlichen Teil der Senkungsmulde als eine Überschätzung der Senkungen. Bezüglich der räumlichen Ausdehnung des Senkungsgebietes führt diese Unter- und Überschätzung zu einer Asymmetrie der Muldenstruktur auf der Nord-Süd-Achse und zu einer Ortsverschiebung der Senkungsmulde nach Süden. Je nach der Größe der Nord-Süd-Bewegungskomponente ist diese Asymmetrie nur wenig, oder in Falle dieser Simulation (vgl. Abbildung 27a und Abbildung 34a), gar nicht erkennbar.



(a)



(b)

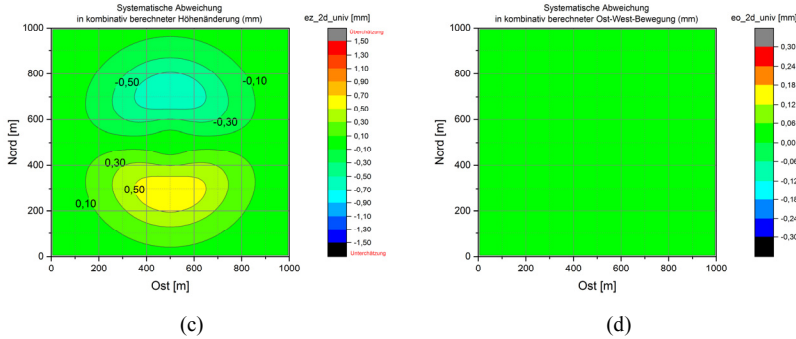
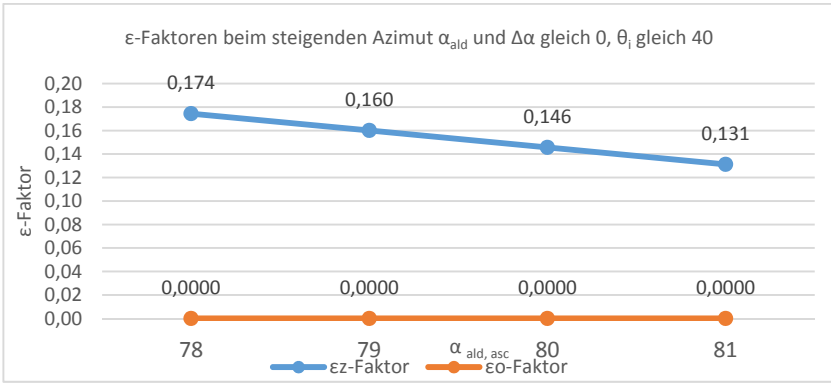


Abbildung 35: Kombinatv berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 40^\circ$, $\alpha_{ald,A} = 81^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 81^\circ$.

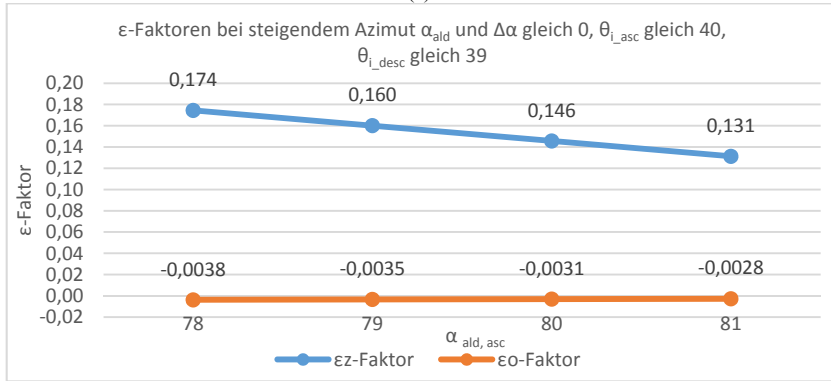
Eine weitere Folge der untereinander gleichbleibenden, zunehmenden Abweichung der Azimute zur Nord-Richtung von Ascending und Descending zeigt der Vergleich von Abbildung 34c und Abbildung 35c. Die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung wird bei größeren Abweichung des Azimutes zu Nord kleiner. Dies kann durch eine einfache Umstellung von der Formel verdeutlicht werden, indem die Formel (4-18) für diese Konstellation wie folgt umgeschrieben wird:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{Z,2D} &= \frac{\sin \theta_i \cdot \sin(\alpha_{ald,A} - 2\pi + \alpha_{ald,A})}{\cos \theta_i \cdot (\sin \alpha_{ald,A} - \sin(2\pi - \alpha_{ald,A}))} \cdot d_{N,wahr} \\
 &= \frac{\sin \theta_i \cdot \sin(2\alpha_{ald,A})}{\cos \theta_i \cdot (2 \sin \alpha_{ald,A})} \cdot d_{N,wahr} \\
 &= \tan \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald,A} \cdot d_{N,wahr} \\
 \varepsilon_Z &= \tan \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald,A}
 \end{aligned} \tag{4-21}$$

Der Term $\tan \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald,A}$ ist hierbei der ε_Z -Faktor für die obengenannte Konstellation, und entscheidet die „Intensität“, mit welcher die vernachlässigte Nord-Süd-Bewegungskomponente als die systematische Abweichung in die kombinatv ermittelte Höhenänderung eingeht. Abbildung 36a zeigt diese ε_Z - und ε_O -Faktoren in Abhängigkeit vom zunehmenden Betrag des Azimuts der Blickrichtung bei der obengenannten Konstellation.



(a)



(b)

Abbildung 36: Darstellung der ϵ_z - und ϵ_o -Faktoren bei steigendem Azimut für (a) $\Delta\alpha = 0^\circ$ und $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 40^\circ$, (b) $\Delta\alpha = 0^\circ$ und $\theta_{i,A} = 40^\circ, \theta_{i,D} = 39^\circ$

Unter Berücksichtigung, dass das Azimut der Ascending-Blickrichtung bei Sentinel-1 im Wertebereich von 78° bis 81° liegt, nimmt der ϵ_z -Faktor mit steigendem Betrag von $\alpha_{ald,A}$ ab, während die ϵ_o -Faktoren bei gleichbleibenden Einfallswinkeln null sind. Bei nicht identischen Einfallswinkeln von Ascending und Descending (vgl. Abbildung 36b) nimmt der Betrag des ϵ_o -Faktors gleichfalls mit steigendem Betrag des Azimuts der Blickrichtung ab.

❖ EINFLUSS DER DIFFERENZ DES AZIMUTS DER BLICKRICHTUNG ZUR NORD-RICHTUNG

Im Folgenden sind die Azimute der Blickrichtung von Ascending und Descending unterschiedlich gewählt worden, um den Einfluss einer Differenz dieses Winkels zu untersuchen. Dazu wird der Winkel bei Ascending auf 81° festgelegt, während er bei Descending $2\pi - 78^\circ$ beträgt. Das Simulationsergebnis ist in Abbildung 37 dargestellt.

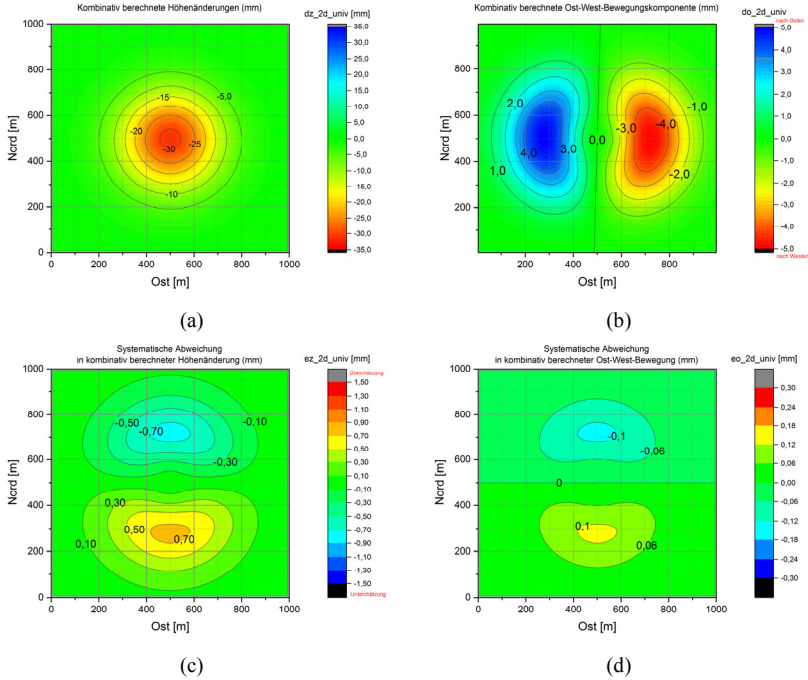


Abbildung 37: Kombinatив berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 40^\circ$, $\alpha_{ald,A} = 81^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 78^\circ$, $\Delta\alpha = 3^\circ$.

Im Vergleich zur systematischen Abweichung in Abbildung 35c zeigt Abbildung 37c eine leichte Zunahme des Fehlers in der kombinatив berechneten Höhenänderung. Um diese auch mathematisch darzustellen, führt man eine Beziehung zwischen den beiden Azimuten ein, $\alpha_{ald,A} = 2\pi - \alpha_{ald,D} + \Delta\alpha$. Dabei bezeichnet $\Delta\alpha$ die Differenz zwischen den Abweichungen zu Nord der beiden Azimute der Blickrichtungen. Somit ergibt sich ausgehend von Formel (4-18) die folgende Beziehung:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{Z,2D} &= \frac{\sin \theta_i \cdot \sin(\alpha_{ald,A} - \alpha_{ald,D})}{\cos \theta_i \cdot (\sin \alpha_{ald,A} - \sin \alpha_{ald,D})} \cdot d_{N,wahr} \\
 &= \frac{\sin \theta_i \cdot \cos \frac{\alpha_{ald,A} - \alpha_{ald,D}}{2}}{\cos \theta_i \cdot \cos \frac{\alpha_{ald,A} + \alpha_{ald,D}}{2}} \cdot d_{N,wahr} = \tan \theta_i \cdot \frac{\cos(\alpha_{ald,A} - \frac{\Delta\alpha}{2})}{\cos \frac{\Delta\alpha}{2}} \cdot d_{N,wahr} \\
 &= \tan \theta_i \cdot \frac{\cos \alpha_{ald,A} \cdot \cos \frac{\Delta\alpha}{2} + \sin \alpha_{ald,A} \cdot \sin \frac{\Delta\alpha}{2}}{\cos \frac{\Delta\alpha}{2}} \\
 &= \tan \theta_i \cdot (\cos \alpha_{ald,A} + \sin \alpha_{ald,A} \cdot \tan \frac{\Delta\alpha}{2}) \cdot d_{N,wahr}
 \end{aligned}$$

$$\varepsilon_0 = \tan \theta_i \cdot (\cos \alpha_{ald,A} + \sin \alpha_{ald,A} \cdot \tan \frac{\Delta\alpha}{2}) \quad (4-22)$$

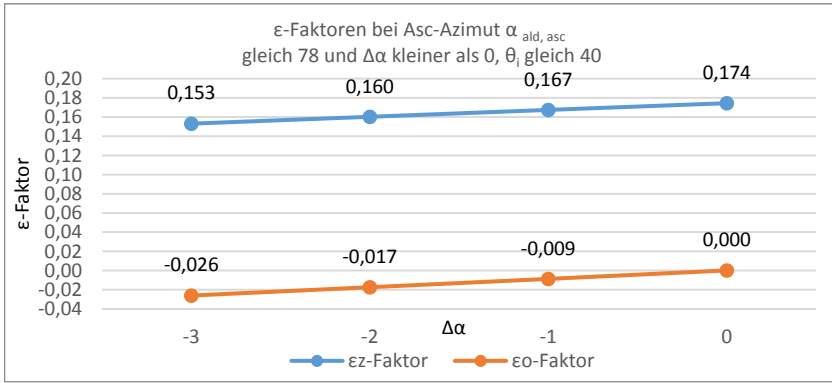
Die Beträge der beiden Faktoren nehmen mit den Azimut-Differenzen zu, und somit auch die systematische Abweichung mit zunehmender Differenz. Bei verschiedenen Abweichungen zu Nord der Azimute der Blickrichtungen tritt eine systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente auf (Abbildung 37d). Diese repräsentiert eine Abweichung der ermittelten Werte gegenüber der tatsächlichen Ost-West-Bewegung. Bei der Interpretation dieser Abweichung muss das Vorzeichen der wahren Ost-West-Bewegung berücksichtigt werden. Ein negativer Wert der systematischen Abweichung bei tatsächlichen Bewegungen nach Osten entspricht einer Unterschätzung in der ermittelten Bewegung, während dieser bei einer wahren Bewegung nach Westen (negatives Vorzeichen der Ost-West-Bewegung) eine Überschätzung in der ermittelten Bewegung nach Westen bedeutet. Tritt in der Realität an einem Ort keine Horizontalbewegung in der Ost-West-Richtung auf, wird eine positive systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente zur Erscheinung von einer Bewegung nach Westen führen. Die annahmebedingte systematische Abweichung führt beim Fall der simulierten Senkungsmulde insgesamt zu einer Verdrehung der räumlichen Verteilung der Ost-West-Bewegung im Vergleich zur Realität (vgl. Abbildung 27d), wobei der Effekt überwiegend den Bereich, in welchem fast ausschließlich Nord-Süd-Bewegung vorkommt, am stärksten betrifft. Z. B. auf der mittleren Nord-Süd-Achse in Abbildung 37b beträgt die maximale systematische Abweichung in der Ost-West-Bewegungskomponente 0,129 mm, während die resultierende Nord-Süd-Bewegung 5 mm ist. Auf der mittleren Ost-West-Achse ist diese Abweichung gleich null.

Die systematische Abweichung in der kombinativ berechneten Ost-West-Bewegungskomponente nimmt gleichfalls mit steigender Azimut-Differenz zu (vgl. Formel (4-23)).

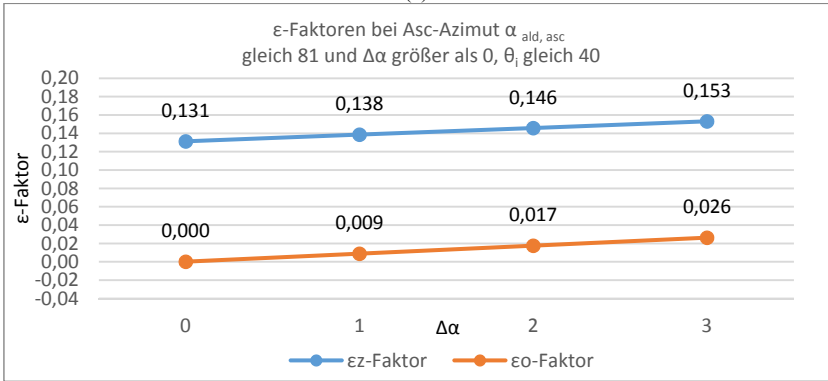
$$\Delta_{0,2D} = \frac{\tan \theta_i \cdot (\cos \alpha_{ald,D} - \cos \alpha_{ald,A})}{\tan \theta_i \cdot (\sin \alpha_{ald,A} - \sin \alpha_{ald,D})} \cdot d_{N,wahr} = \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \cdot d_{N,wahr}$$

$$\varepsilon_0 = \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \quad (4-23)$$

In Abbildung 38 werden die ε_Z - und ε_0 -Faktoren in Abhängigkeit von steigenden Beträgen der Azimut-Differenzen dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 38: Darstellung der ε_Z und ε_O -Faktoren bei steigendem Delta-Azimet für (a) $\Delta\alpha \leq 0^\circ$ und $\theta_{i,A} = 40^\circ$, (b) $\Delta\alpha \geq 0^\circ$ und $\theta_{i,A} = 40^\circ$

Der ε_O -Faktor zeigt hierbei eine reine Abhängigkeit zur Azimut-Differenz, wobei die Größenordnung der Azimute von Ascending bzw. Descending keine Rolle spielt. Dies kann durch die gleichen Beträge vom letzten Wert des ε_O -Faktors in Abbildung 38a (orange Kurve, $\alpha_{ald,A} = 78^\circ, \Delta\alpha = 0$) und vom ersten Wert des ε_O -Faktors in Abbildung 38b (orange Kurve, $\alpha_{ald,A} = 81^\circ, \Delta\alpha = 0$) die gleiche Tendenz der beiden Kurven verdeutlicht werden. Ein negatives Vorzeichen des ε_O -Faktors indiziert eine entgegen dem Uhrzeigersinn gebildete Asymmetrie des Ost-West-Bewegungsgebietes.

Im Gegensatz dazu hängt der ε_Z -Faktor sowohl von der Azimut-Differenz als auch von der Größenordnung der beiden Azimute ab. Durch den Vergleich vom letzten Wert des ε_Z -Faktors in Abbildung 38a (blaue Kurve, $\alpha_{ald,A} = 78^\circ, \Delta\alpha = 0$) und vom ersten Wert des ε_Z -Faktors in Abbildung 38b (blaue Kurve, $\alpha_{ald,A} =$

$81^\circ, \Delta\alpha = 0$) stellt sich heraus, dass der größere Azimut der Blickrichtung generell in einem kleineren ε_Z -Faktor resultiert. Der Tendenz, dass der ε_Z -Faktor mit zunehmenden positiven Azimut-Differenzen steigt, ist allerdings bei negativer Azimut-Differenz umgekehrt. Mit zunehmendem Betrag der negativen Azimut-Differenz, d. h., dass die Blickrichtung der Descending-Aufnahmen näher an der Ost-West-Achse als die der Ascending-Aufnahmen sind, vermindert sich der ε_Z -Faktor. Durch den Vergleich von Abbildung 34c und Abbildung 37d ist es auch bemerkbar, dass die Abweichung in Höhenänderungen bei einer Differenz von 3° , mit einem azimuthalen Winkelbetrag von 78° und einem anderen von 81° , kleiner als bei zwei gleichen azimuthalen Winkelbeträgen von 78° ist. Somit ist der Einfluss des Winkelbetrags auf die Zunahme der systematischen Abweichung größer als die Winkeldifferenz.

❖ EINFLUSS DER GRÖÖE DES EINFALLSWINKELS

Ein Einfluss der Größe der Einfallswinkel von Ascending- und Descending-Aufnahmen kann ebenfalls wie der Einfluss der Azimute der Blickrichtung getestet werden, indem die Einfallswinkel und Azimute zunächst gleichgesetzt werden, und danach der Wert des Einfallswinkels erhöht wird.

Abbildung 39 zeigt einen Vergleich zwischen den unter den Einfallswinkeln 30° und 45° ermittelten Höhenänderungen und die jeweiligen systematischen Abweichungen. Da es bei dieser Konstellation keine systematische Abweichung in der kombinatorisch berechneten Ost-West-Bewegung gibt, wird dieses Simulationsergebnis hier nicht gezeigt.

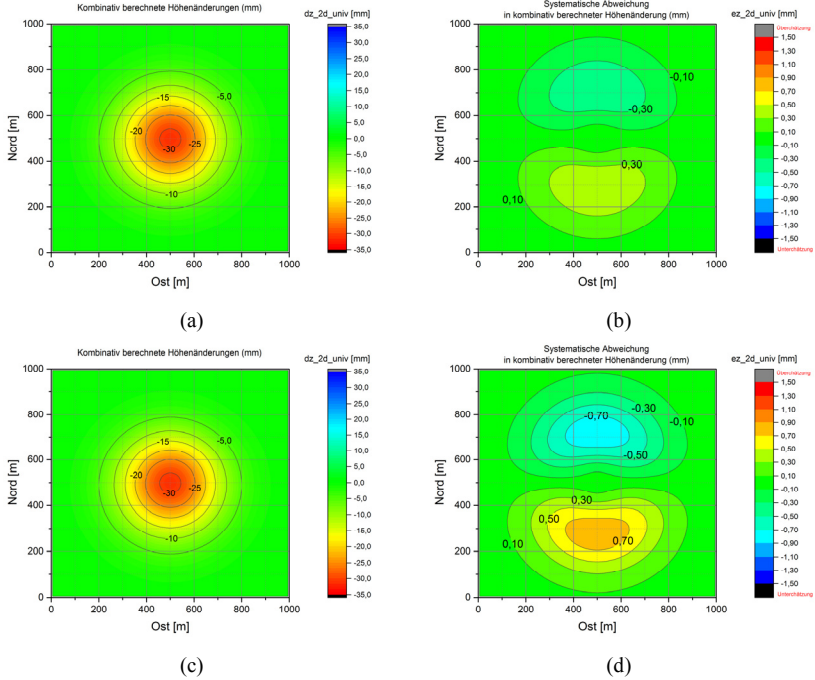
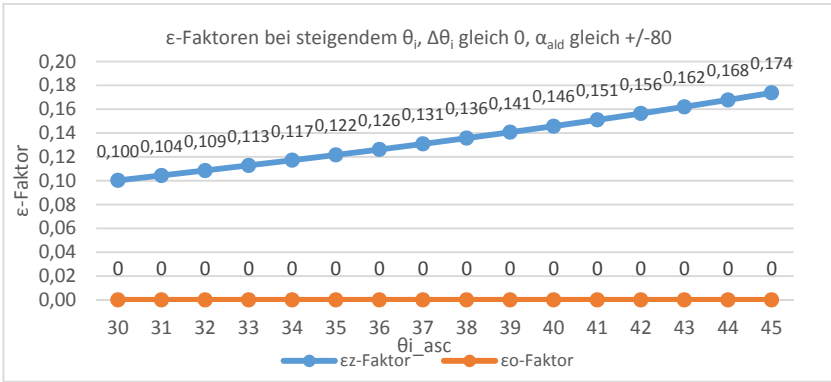
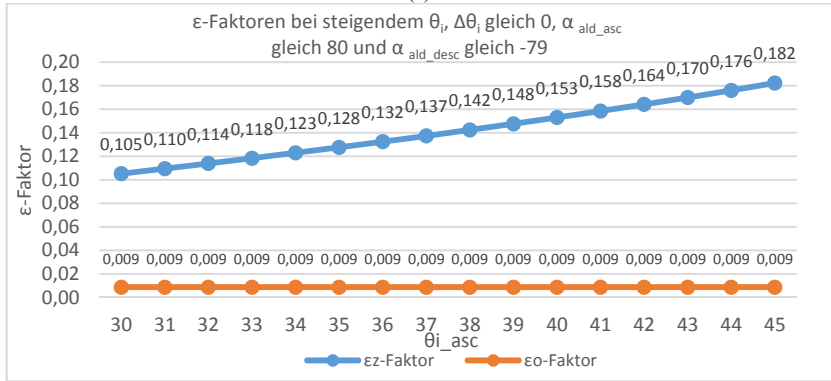


Abbildung 39: Kombinativ berechnete Höhenänderung (a) und die systematische Abweichung (b) in der ermittelten Höhenänderung bei der Winkelkombination $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 30^\circ$, $\alpha_{ald,A} = 80^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 80^\circ$; Kombinativ berechnete Höhenänderung (c) und die systematische Abweichung (d) in der ermittelten Höhenänderung bei der Winkelkombination $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 45^\circ$, $\alpha_{ald,A} = 80^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 80^\circ$.

Ein Vergleich von Abbildung 39b und Abbildung 39d ergibt, dass die systematische Abweichung bei Zunahme des jeweils gleich großen Einfallswinkel für Ascending und Descending größer wird. Diese Eigenschaft ist auch mittels Formel (4-21) und Abbildung 40a nachzuvollziehen. Somit bewirkt eine steilere Blickrichtung eine Verringerung der systematischen Abweichung in den kombinativ berechneten Höhenänderungen.



(a)



(b)

Abbildung 40: Darstellung der ε_z - und ε_o -Faktoren bei steigendem θ_i für (a) $\alpha_{ald,A} = 80^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 80^\circ$ und $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 30^\circ, 31^\circ, \dots, 45^\circ$ (b) $\alpha_{ald,A} = 80^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 79^\circ$ und $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 30^\circ, 31^\circ, \dots, 45^\circ$

Während für die Berechnungen, die zu den Ergebnissen in Abbildung 40a führten, keine Azimut-Unterschied zwischen den Aufnahmerrichtungen zugrunde gelegt wurde, stellt Abbildung 40b die Entwicklung der Faktorenwerte für einen Azimut-Unterschied von 1° dar. Im Vergleich zur Abbildung 40a ist hier der ε_o -Faktor nicht mehr null. Allerdings bleibt auch hier der Wert des ε_o -Faktors konstant trotz Zunahme der jeweils gleichen Einfallswinkel für Ascending und Descending. Für den ε_o -Faktor spielt somit die Größe der Einfallswinkel daher keine Rolle, solange die Einfallswinkel von Ascending und Descending gleichbleiben. Dies ist auch durch Formel (4-24), welche der Formel (4-18) unter der Bedingung $\theta_{i,A} = \theta_{i,D}$ entspricht, nachzuvollziehen.

$$\begin{aligned}\Delta_{O,2D} &= \frac{\tan \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald,D} - \tan \theta_i \cdot \cos \alpha_{ald,A}}{\tan \theta_i \cdot \sin \alpha_{ald,A} - \tan \theta_i \cdot \sin \alpha_{ald,D}} \cdot d_{N,wahr} \\ &= \frac{\cos \alpha_{ald,D} - \cos \alpha_{ald,A}}{\sin \alpha_{ald,A} - \sin \alpha_{ald,D}} \cdot d_{N,wahr}\end{aligned}\quad (4-24)$$

❖ EINFLUSS VON UNTERSCHIEDEN IN DEN EINFALLSWINKELN

Während bei den bisherigen Untersuchungen die Einfallswinkel der Ascending- und Descending- Blickrichtung immer gleich waren, soll nun untersucht werden, welchen Einfluss Unterschiede zwischen den Einfallswinkel der Ascending- und Descending-Aufnahmen haben. Hierzu erhalten die Azimute der Blickrichtung Werte, wie sie auch der Abbildung 39 zugrunde liegen. Für die Untersuchung wird der Einfallswinkel für Ascending auf 30° gesetzt und der Einfallswinkel für Descending auf 40° und ein weiteres Mal auf 45° . Die Ergebnisse der Simulation zeigen Abbildung 41 und Abbildung 42.

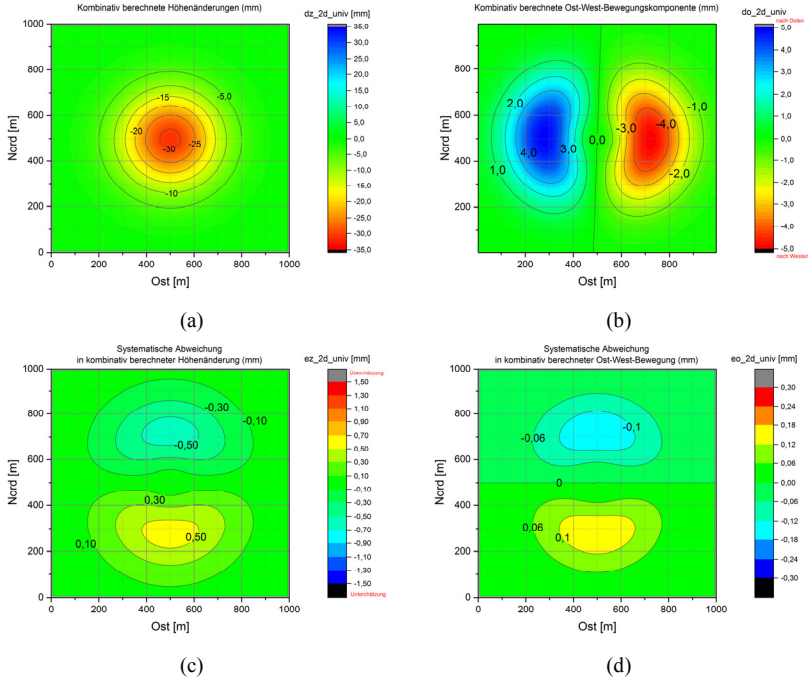


Abbildung 41: Kombinatив berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta_{i,A} = 30^\circ$, $\theta_{i,D} = 40^\circ$, $\alpha_{ald,A} = 80^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 80^\circ$

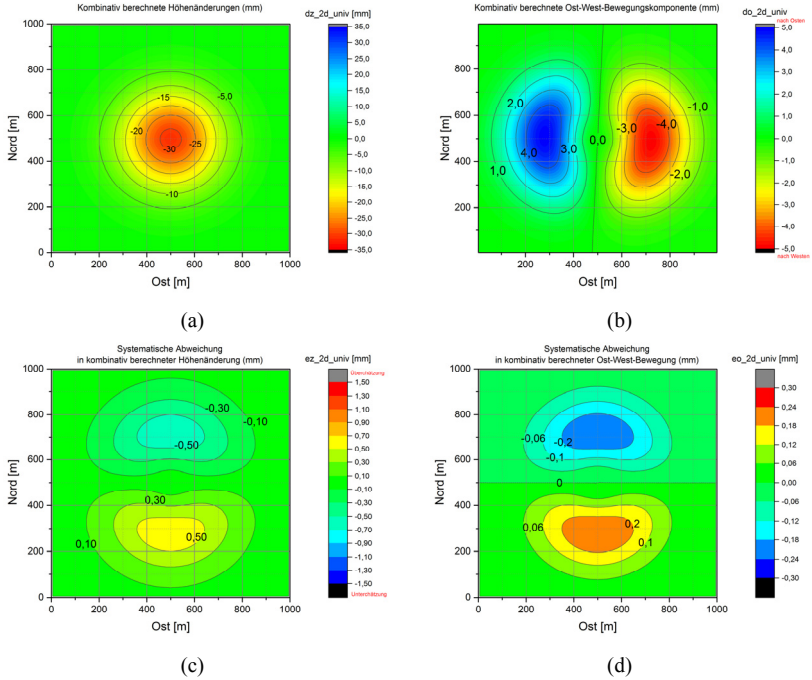
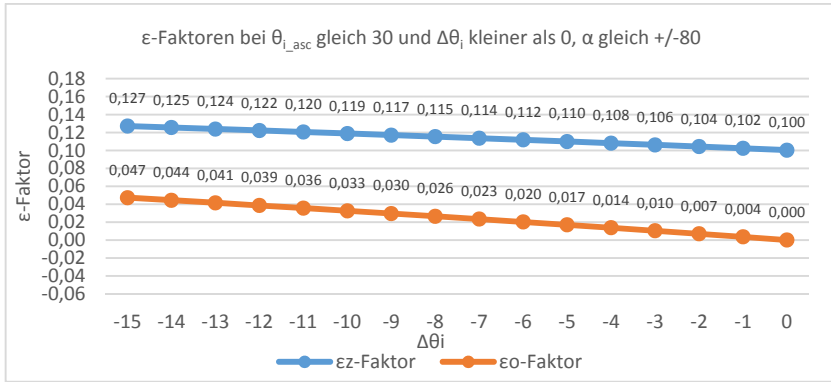
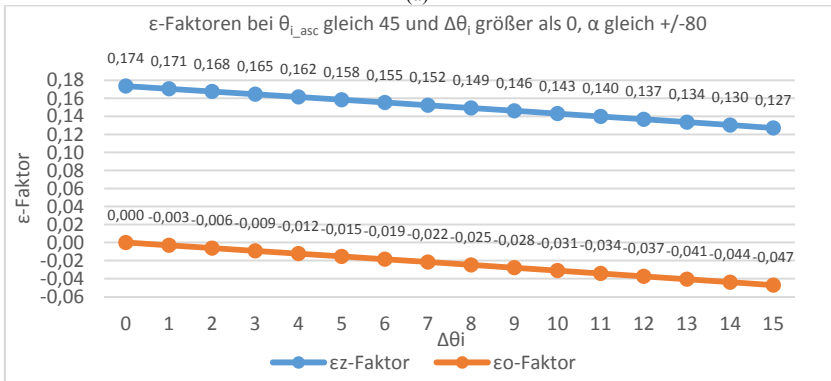


Abbildung 42: Kombinatив berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta_{i,A} = 30^\circ$, $\theta_{i,D} = 45^\circ$, $\alpha_{ald,A} = 80^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 80^\circ$

Die zunehmende Differenz zwischen den Einfallswinkel führt zu einer Erhöhung der systematischen Abweichungen, sowohl in den ermittelten Höhenänderungen als auch vor allem in den Ost-West-Bewegungen. Allerdings ist es auch durch den Vergleich von Abbildung 42c und Abbildung 39d bemerkbar, dass die Abweichung in Höhenänderungen bei einer großen Einfallswinkeldifferenz von 15° mit einem flachen Einfallswinkel bei 45° und einem steilen Einfallswinkel von 30° kleiner als bei zwei gleichen aber flachen Einfallswinkeln mit 45° ist. In Abbildung 43 werden die ε_Z - und ε_O -Faktoren in Abhängigkeit einer Zunahme der Einfallswinkeldifferenzen gezeigt.



(a)



(b)

Abbildung 43: Darstellung der ε_Z - und ε_O -Faktoren bei steigendem Azimut für $\alpha_{ald,A} = 80^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 80^\circ$ und (a) $\theta_{i,A} = 30^\circ, \Delta\theta = -15^\circ, -14^\circ, \dots, 0^\circ$ (b) $\theta_{i,A} = 45^\circ, \Delta\theta = 0^\circ, 1^\circ, \dots, 15^\circ$

Gleichfalls wie bei dem Azimut der Blickrichtung kann hierbei auch festgestellt werden, dass der Einfluss des Winkelbetrags größer als der Einfluss der Winkeldifferenz ist. Zudem führt ein steilerer Ascending-Einfallswinkel zu einem kleineren ε_Z -Faktor innerhalb des gewählten Wertbereiches des Einfallswinkels. Bei begrenzten Kombinationen an Ascending- und Descending-Aufnahmen ist die Kombination mit z. B. einem steileren Ascending-Einfallswinkel für die Reduktion der systematischen Abweichungen in Höhenänderungen vorteilhaft. Dagegen hat diese auf der somit kombinatorisch berechneten Ost-West-Bewegungskomponente keinen zusätzlichen Einfluss.

❖ ALLGEMEINE EMPFEHLUNGEN FÜR DIE DATENAUSWAHL

Aus den Untersuchungen über die Auswirkungen der verschiedenen Kombinationen von Einfallswinkeln und Azimuten der Blickrichtung auf die systematischen Abweichungen der abgeleiteten Höhenänderungen und der Ost-West-Komponente ergeben sich zusammenfassend die folgenden Erkenntnisse über die ε_Z - und ε_O -Faktoren, welche den Einfluss auf die systematischen Abweichungen der beiden Bewegungskomponenten infolge der vernachlässigten Nord-Süd-Bewegungskomponente ausdrücken:

- Der ε_Z -Faktor nimmt mit zunehmendem Betrag des Azimuts der Blickrichtung der beiden Aufnahmegeometrien ab, mit steigender positiver Azimut-Differenz zu und mit steigendem Betrag der negativen Azimut-Differenz ab.
- Der ε_Z -Faktor wird bei zunehmendem Einfallswinkel größer, und bei steigenden positiven Einfallswinkeldifferenzen geringer, nimmt aber bei steigendem Betrag der negativen Einfallswinkel mit geringer Steigung zu.
- Der ε_O -Faktor wird null sein, wenn die Einfallswinkel und die Beträge des Azimuts der Blickrichtung von Ascending und Descending jeweils identisch sind, nimmt allerdings bei unterschiedlichen Einfallswinkeln mit steigendem Betrag des Azimuts ab. Mit zunehmenden Beträgen der Azimut-Differenz wird auch der Betrag des ε_O -Faktors größer, wobei sein Vorzeichen mit der Azimut-Differenz $\Delta\alpha$ identisch bleibt.
- Der ε_O -Faktor ist unabhängig von der Größe der Einfallswinkel, wenn die Einfallswinkel von Ascending und Descending identisch sind. Sein Betrag nimmt mit größer werdenden Beträgen der Einfallswinkeldifferenzen zu, während das Vorzeichen des Faktors umgekehrt zum Vorzeichen der Einfallswinkeldifferenz ist.

Da die ε_Z - und ε_O -Faktoren von der jeweiligen Konstellation abhängig sind, ergibt sich anhand der obengenannten Eigenschaften die Möglichkeit, die systematischen Abweichungen in den beiden abgeleiteten Bewegungskomponenten trotz der unbekannten Nord-Süd-Bewegungskomponente zu reduzieren, wenn mehrere Tracks für das Untersuchungsgebiet zur Verfügung stehen. Als vorteilhaft für die Ermittlung einer fehlerfreien Ost-West-Bewegungskomponente hat sich die Kombination von gleichen Einfallswinkeln und gleichen Beträgen der Azimute der Blickrichtung von Ascending und Descending erwiesen. Da bei einer solchen Kombination der ε_O -Faktor null wird, tritt keine systematische Abweichung in der Ost-West-Bewegungskomponente auf, also auch unabhängig von der Größe der vernachlässigten Nord-Süd-Komponente. Im Gegensatz dazu wird der ε_Z -Faktor bei den möglichen Kombinationen der Konstellation nie Null werden.

Somit wäre eine ideale Kombination der Aufnahmekonstellation, bei der die systematischen Abweichungen in der Ost-West-Bewegungskomponente null und für die Höhenänderungen am geringsten sind, gegeben, wenn die Blickrichtungen von Ascending und Descending möglichst steil verlaufen und gleich sind und die Blickrichtungen in der Horizontalebene möglichst parallel zur Ost-West-Achse ausgerichtet sind.

Stellen die Datensätze die gleichen Einfallswinkel und Azimute der Blickrichtung nicht zur Verfügung, sollten für die Reduktion des ε_O -Faktors möglichst kleine Differenzen in den beiden Winkel gewählt werden, während die Azimute der Blickrichtung möglichst nah zur Ost-West-Achse liegen sollen. Die Größenordnung der Einfallswinkel hat keinen Einfluss auf diesem Faktor, sondern nur deren Differenz, d. h. die Kombinationen von Einfallswinkeln mit 30° und 31° und mit 40° und 41° resultieren bei der gleichen Azimut-Konstellation im identischen ε_O -Faktor. Dazu muss allerdings ein weiterer Aspekt bei der Begünstigung der Ermittlung der Ost-West-Komponente auch berücksichtigt werden, welcher das Vorzeichen des ε_O -Faktors betrifft. Wenn die Azimut-Differenz $\Delta\alpha$ ein positives Vorzeichen besitzt, d. h. $\alpha_{ald,A} > 2\pi - \alpha_{ald,D}$, wird eine Einfallswinkeldifferenz $\Delta\theta$ mit einem negativen Vorzeichen den Betrag des ε_O -Faktors vergrößern, was für die Reduktion der systematischen Abweichung in der Ost-West-Bewegungskomponente ungünstig wäre. Dies gilt auch für die Kombination mit der negativen Azimut-Differenz und positiven Einfallswinkeldifferenz. Bei solchen Fällen, dass die beiden Winkel bzw. deren Differenzen verschiedene Wirkungen auf die ε_O -Faktoren haben, müssen die ε_O -Faktoren der verschiedenen Kombinationen mit realen Konstellationsdaten ausgerechnet werden, um über eine optimale Wahl der Datensätze entscheiden zu können.

Um einen kleinen ε_Z -Faktor zu erhalten, sollen die Einfallswinkel möglichst steil sein, wobei ein steilerer Einfallswinkel des steilsten Draufblicks von beiden Aufnahmen mehr zur Reduktion des ε_Z -Faktors beitragen kann. Gleichmaßen gilt dies auch für ein möglichst Ost-West-Achse nahes Azimut der Blickrichtung. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Kombinationen mit gleichen aber flachen Einfallswinkeln, bzw. gleichen aber nördlicheren Azimuten größere ε_Z -Faktoren verursachen als die Kombinationen, bei denen mindestens eine der beiden Aufnahmen einen steileren Einfallswinkel bzw. ein östlicheres Azimut besitzt.

Konkret lassen sich diese Ergebnisse an folgenden Beispielen erläutern. Es ergeben sich für Sentinel-1 die optimalen ε_Z - und ε_O -Faktoren mit den Werten von ca. 0,09 und 0 bei der Konstellation von $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 30^\circ$ und $\alpha_{ald,A} = 2\pi - \alpha_{ald,D} = 81^\circ$. Die im Gegensatz dazu ungünstigste Konstellation für die Ermittlung der Höhenänderung ergibt sich trotz gleicher Winkel bei $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 45^\circ$

und $\alpha_{ald,A} = 2\pi - \alpha_{ald,D} = 78^\circ$ mit dem ε_Z -Faktor 0,206. Vergleicht man diese mit der ungünstigsten Konstellation von Sentinel-1 bei der Ermittlung der Höhenänderung mittels der Einzelaufnahmegeometrie, könnte die größte systematische Abweichung in der mit sich kreuzenden Tracks kombinativ berechneten Höhenänderung fünf-fach kleiner als die mittels der Einzelaufnahmegeometrie umgerechneten Höhenänderung sein, wenn die Beträge der größten Nord-Süd-Bewegung und der größten Horizontalbewegung als identisch angenommen würden. Dort weist der größte konstellationsbedingte Multiplikator, welcher als ein Äquivalent zum ε_Z -Faktor betrachtet werden kann, bei dem 45° Einfallswinkel auf den Wert 1. Der größte ε_Z -Faktor hier ist sogar kleiner als die Hälfte dieses konstellationsbedingten Multiplikators der Einzelaufnahmegeometrie bei 30° (Kapitel 4.2.2).

Ferner, wenn die Einfallswinkel nicht identisch sind, führt die Konstellation mit $\theta_{i,A} = 45^\circ, \theta_{i,D} = 30^\circ$ und $\alpha_{ald,A} = 2\pi - \alpha_{ald,D} = 78^\circ$ zu einer Verbesserung mit einem geringeren ε_Z -Faktor von 0,152. Des Weiteren liegt eine der ungünstigsten Konstellationen für die Ermittlung der Ost-West-Bewegungskomponente mit unterschiedlichen Winkeln $\alpha_{ald,A} = 78^\circ, 2\pi - \alpha_{ald,D} = 81^\circ$ und $\theta_{i,A} = 45^\circ, \theta_{i,D} = 30^\circ$ vor, da sich ein ε_O -Faktor von -0,076 und ein ε_Z -Faktor von 0,134 ergibt.

4.3.2.2 *Auswirkung der vernachlässigten Nord-Süd-Bewegungskomponente*

Die Untersuchung über die ε -Faktoren zeigt, dass die vernachlässigte Nord-Süd-Bewegungskomponente die kombinativ berechneten Höhenänderung um 9% bis 20% ihres Wertes verfälschen kann, bzw. bis 7,6% als Abweichung in die Ost-West-Bewegungskomponente eingeht. Dieses Verhältnis ist im Vergleich zum Verfahren mittels einer LoS-Messung (vgl. Kapitel 4.2.2 und Formel (4-7)) deutlich kleiner, weil die vernachlässigte Horizontalbewegung bis 50% ihres Wertes (mit 45° als Einfallswinkel) als Abweichung in die ermittelte Höhenänderung eingehen kann. Damit wird zwar ein grober Ausblick über die mögliche systematische Abweichung verschafft, für eine quantitative Aussage über die systematische Abweichung reicht dies jedoch nicht aus, da der tatsächliche Wert der vernachlässigten Nord-Süd-Bewegungskomponente unbekannt ist. Für die Veranschaulichung der systematischen Abweichung in den vorherigen Untersuchungen wurde ein einfaches Bodenbewegungsmodell verwendet, wodurch alle drei wahren Bewegungskomponenten bekannt sind und mit den zwei ermittelten Bewegungskomponenten verglichen werden konnten. Dies kann allerdings nicht auf alle Untersuchungsgebiete in der Realität übertragen werden. Die Untersuchung über den Einfluss der unbekannten Nord-Süd-Bewegungskomponente

sollte dazu dienen allgemein gültige Aussagen zu treffen, bzw. Randbedingungen für weitere Modellannahmen zu überprüfen, welche für die Ermittlung der Nord-Süd-Bewegungskomponente hilfreich sein könnten.

Um diese Auswirkungen genauer zu untersuchen, ist es nötig den Einfluss weiter zu analysieren. Die systematische Abweichung ist laut Formel (4-17) und (4-18) linear abhängig von der Nord-Süd-Bewegungskomponente. Dies führt dazu, dass die räumliche Ausbreitung der Nord-Süd-Bewegungskomponente das Grundmuster der systematischen Abweichung sein wird (vgl. Abbildung 27c und die Abbildungen der systematischen Abweichung). Daraus kann die erste Eigenschaft der Nord-Süd-Bewegungsauswirkung erkannt werden, dass die Gebiete ohne Nord-Süd-Bewegungen, also $d_{N,wahr} = 0$, auch keine systematische Abweichung bei der kombinativen Berechnung erhalten werden.

Im Gegensatz dazu, werden die ermittelten Bewegungskomponenten an den Stellen wo die Nord-Süd-Bewegungen maximal sind am stärksten verfälscht. Eine Aussage über die Größe dieses Fehlers kann mithilfe der Relation zwischen den zu ermittelnden Bewegungskomponenten und der Nord-Süd-Bewegung erfolgen. Hieraus lässt sich schließen, dass um die ermittelten Höhenänderung um mehr als 10% zu verfälschen, d. h. $\|\varepsilon_Z\| = 10\% \cdot d_{Z,wahr} \rightarrow \varepsilon_Z\text{-Faktor} \cdot d_{N,wahr} = 0,1 \cdot d_{Z,wahr}$, muss das Verhältnis zwischen der Nord-Süd-Bewegungskomponente und der Höhenänderung $\frac{d_{N,wahr}}{d_{Z,wahr}}$ größer als $0,1/\varepsilon_Z$ -Faktor sein. In Fälle der ungünstigsten Aufnahmekonstellation mit dem ε_Z -Faktor von ca. 0,2, sollte das Verhältnis $\frac{d_{N,wahr}}{d_{Z,wahr}}$ mindestens 0,5 betragen. Darüber hinaus liegt für die ermittelte Ost-West-Komponente das mindeste Verhältnis $\frac{d_{N,wahr}}{d_{O,wahr}}$ im Falle $\varepsilon_O = 0,076$ bei 1,32 ($0,1/\varepsilon_O$ -Faktor).

In einem Bodenbewegungsgebiet in welchem die Höhenänderung um einen Bewegungsschwerpunkt geschlossene Linien gleicher Höhenänderung aufweist, und die Horizontalbewegung auf derselben Isolinie mit fester Relation zur Höhenänderung in der Richtung zu oder weg vom Bewegungsschwerpunkt zeigt, können die Stellen mit den maximalen Nord-Süd-Bewegungen dort auftreten, wo im Bewegungsgebiet Ost-West-Bewegungen nicht vorkommen. Unter dieser Modellvorstellung erreicht im Bewegungsgebiet die Ost-West-Bewegung auf jeder Linie gleicher Höhenänderung bzw. Horizontalbewegung ebenfalls ihr Maximum, wenn Nord-Süd-Bewegung gleich Null wird. An solchen Stellen ist selbstverständlich ebenfalls keine systematische Abweichung zu erwarten.

Unter derselben Modellvorstellung können noch zusätzlich zwei Zusammenhänge zwischen den Ost-West- und Nord-Süd-Bewegungskomponenten herausgezogen werden. Einerseits erfüllen die beiden Bewegungskomponenten die Beziehung $\frac{d_{O,wahr}}{d_{N,wahr}} = \tan \alpha_{\vec{d}}$, wobei $\alpha_{\vec{d}}$ das Azimut der Horizontalbewegung ist. Andererseits kann der Betrag der Horizontalbewegung durch $\sqrt{d_{O,wahr}^2 + d_{N,wahr}^2}$ berechnet werden, und somit kann die zweite Eigenschaft der beiden Bewegungskomponenten erhalten werden, wonach sich die Punkte mit $\|d_{O,wahr}\| = x \neq 0$ und $d_{N,wahr} = 0$ im Bewegungsgebiet und die Punkte mit $\|d_{N,wahr}\| = x$ und $d_{O,wahr} = 0$ auf derselben Linie gleicher Höhenänderung befinden, wenn das Verhältnis $\frac{d_{hor,wahr}}{d_{Z,wahr}}$ entlang jeder Isolinie der Höhenänderung ein konstanten Wert beträgt.

Die zwei Eigenschaften bieten vor allem eine Möglichkeit, die systematische Abweichung im Zusammenhang mit der horizontalen Bewegungsrichtung abzuschätzen. Wenn z. B. eine systematische Abweichung in der kombinatorisch berechneten Ost-West-Bewegungskomponente kleiner als 10% der wahren Ost-West-Bewegung zu erwarten ist, sollte die Richtung der Horizontalbewegung, durch die Lösung von $\left\| \frac{d_{O,wahr}}{d_{N,wahr}} \right\| = \|\tan \alpha_{\vec{d}}\| \leq 1,32$, im Bereich $[37^\circ, 143^\circ] \cup [217^\circ, 323^\circ]$ liegen. Für die Höhenänderung kann dies mit z. B. einem bekannten Verhältnis zwischen der Horizontalbewegung und Höhenänderung $\frac{d_{hor,wahr}}{d_{Z,wahr}} = C$ ebenfalls gelöst werden. Gilt beispielhaft $C = 1$, so ergibt die Berechnung von $\left\| \frac{d_{N,wahr}}{d_{Z,wahr}} \right\| = \left\| \frac{d_{N,wahr}}{d_{hor,wahr}} \right\| = \|\cos \alpha_{\vec{d}}\| \leq 0,5$, worauf bei den Horizontalbewegungen in der Richtung $[60^\circ, 120^\circ] \cup [240^\circ, 300^\circ]$ eine systematische Abweichung kleiner als 10% der wahren Höhenänderung erwartet werden. In Abbildung 44 werden die obengenannten Winkelbereiche am Beispiel eines symmetrischen kreisförmigen Senkungsmodell schematisch mit grüner Farbe dargestellt. Beim Verhältnis $C > 1$ kann der Winkelbereich der Horizontalbewegungsrichtung weitergehend verkleinert werden. Somit gilt die beispielhafte Schätzung der systematischen Abweichung mit kleiner 10% für die Ost-West-Bewegungskomponenten für die ganze grün markierte Fläche (vgl. Abbildung 44a), während es für die Höhenänderung nur auf der Linie gleicher Höhenänderung mit $C = 1$ gültig ist (vgl. Abbildung 44b).

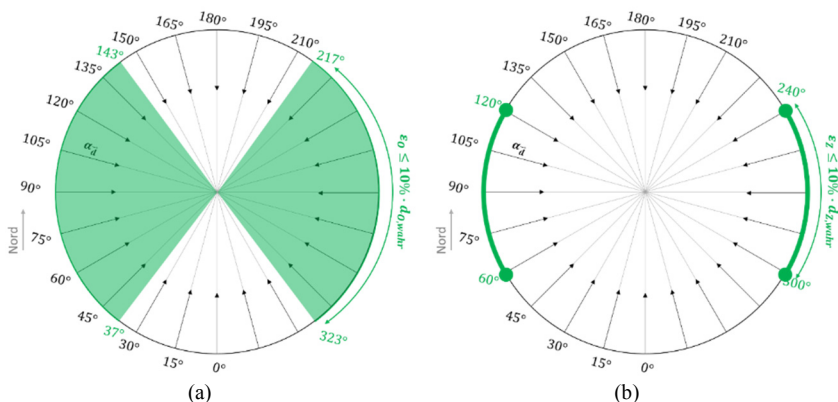


Abbildung 44: Winkelbereiche für einen Fehler <10% für die Ost-West-Bewegungskomponenten für (a) $C>1$ und (b) $C=1$

Ferner lässt sich diese systematische Abweichung in Profilen darstellen. Durch die zuvor dargelegten Untersuchungen über die Einflüsse der Aufnahmekonstellation tritt die systematische Abweichung in der kombinativ berechneten Höhenänderung räumlich in Form der resultierten Nord-Süd-Bewegung auf (z. B. Abbildung 35c). Bezogen auf die simulierte Senkungsmulde, bei der eine symmetrische Form angenommen wird, führt dies dazu, dass die kombinativ berechneten Senkungsmulde entlang einer Nord-Süd-Profilspur eine Asymmetrie aufweist (siehe Abbildung 45a).

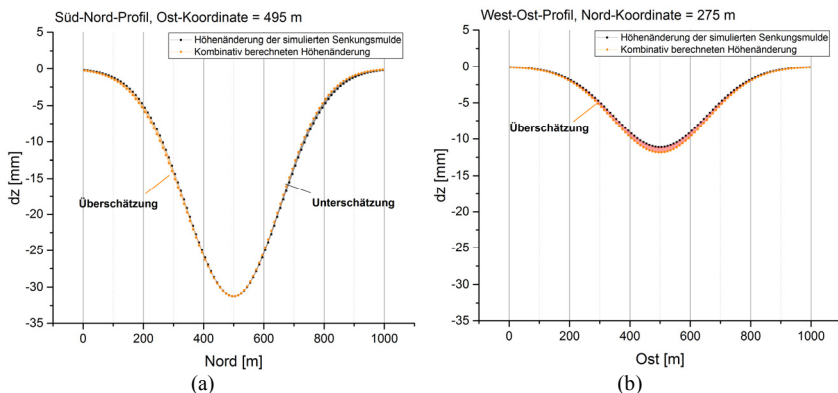


Abbildung 45: Süd-Nord-Profil und West-Ost-Profil der wahren und kombinativ berechneten Höhenänderung. (a) Süd-Nord-Profil (die Profilspur geht von Süden nach Norden) durch die Senkungsmulde (Ost-Koordinate = 495 m); (b) West-Ost-Profil durch den Punkt mit der maximalen Nord-Süd-Bewegung im Süden (Ost-Koordinate = 275 m)

In Abbildung 45a ist der Vergleich der wahren und kombinatив berechneten Höhenänderung ersichtlich. Die gewählte Profilsur erstreckt sich durch die Mitte der simulierten Senkungsmulde, an welcher Stelle die durch Nord-Süd-Bewegungen verursachte systematische Abweichung am größten sein muss. Diese Asymmetrie der kombinatив berechneten Senkungsmulde, in Form von Über- und Unterschätzung jeweils auf der südlichen und nördlichen Seite der Senkungsmulde, zeigt zwar eine gewisse Ähnlichkeit zur aus der Einzelgeometrie berechneten Höhenänderung in Abbildung 30, jedoch eine viel kleinere Größenordnung. Dadurch lässt sich die höhere Zuverlässigkeit der kombinatив berechneten Höhenänderung gegenüber der aus der Einzelgeometrie berechneten Höhenänderung beweisen. Zudem verursacht die systematische Abweichung auf ein Ost-West-Profil bei der Unterschätzung eine Abflachung der Senkungsmulde, und bei der Überschätzung eine Überhöhung, welche in Abbildung 45b dargestellt wird. Bei der simulierten Situation lässt die kombinatив berechnete Senkungsmulde auf der Ost-West-Profilsur keine Asymmetrie erkennen.

In Abbildung 45a lässt sich zwar eine asymmetrische Form der kombinatив berechneten Senkungsmulde feststellen, allerdings ist auf diesem Profil keine Lageveränderung des Senkungsmaximums zu erkennen. Begründet ist dies mit dem Einfluss der maximalen systematischen Abweichung, welche in den Bereichen der maximalen Nord-Süd-Bewegung am größten ist. Im Gegensatz dazu, dort, wo keine Nord-Süd-Bewegung vorkommt, ist dementsprechend keine daraus entstandene systematische Abweichung zu erwarten. Dies führt dazu, dass der Betrag der systematischen Abweichung in der Senkungsmitte und ihrer unmittelbaren Umgebung, bzw. am Rand eines Senkungsgebietes, wo weder Höhenänderung noch Horizontalbewegung erscheinen, ebenfalls gering (z. B. kleiner 1 mm) sein muss. In der Senkungsmitte, wo am Beispiel der Simulation die maximale Senkung 30 mm beträgt, ist eine solche Fehlerschätzung von weniger als 1 mm nicht signifikant. Die Lageverschiebung des Senkungsmaximums wird auf den Profilen, die weiter als das Maximum der Nord-Süd-Bewegung von der Senkungsmitte entfernt sind, eindeutig. Um dieses Phänomen zu visualisieren, wird eine Reihe von Nord-Süd-Profilen mit einem zunehmenden Abstand zur Senkungsmitte dargestellt. Im Profil auf der Ost-Koordinate von 295 m, d. h. 209 m von der Senkungsmitte entfernt, ist bereits eine leichte Verschiebung der Senkungsmitte nach Süden wahrnehmbar. Beim Profil auf der Ost-Koordinate von 195 m wird dies noch deutlicher. Beim letzten Profil, welches sich am Rand des Senkungsgebietes befindet, sollte die Lageverschiebung der Senkungsmitte zwar größer sein, dort beträgt die Höhenänderung entlang dieses Profils jedoch nur knapp 1 mm. Solche Höhenänderungen sind bei den praktischen Messungen

nicht signifikant. Bei der Simulation ergab sich eine Lageverschiebung des Senkungsmaximums von weniger als 15 m in einem 1000 m x 1000 m Senkungsgebiet.

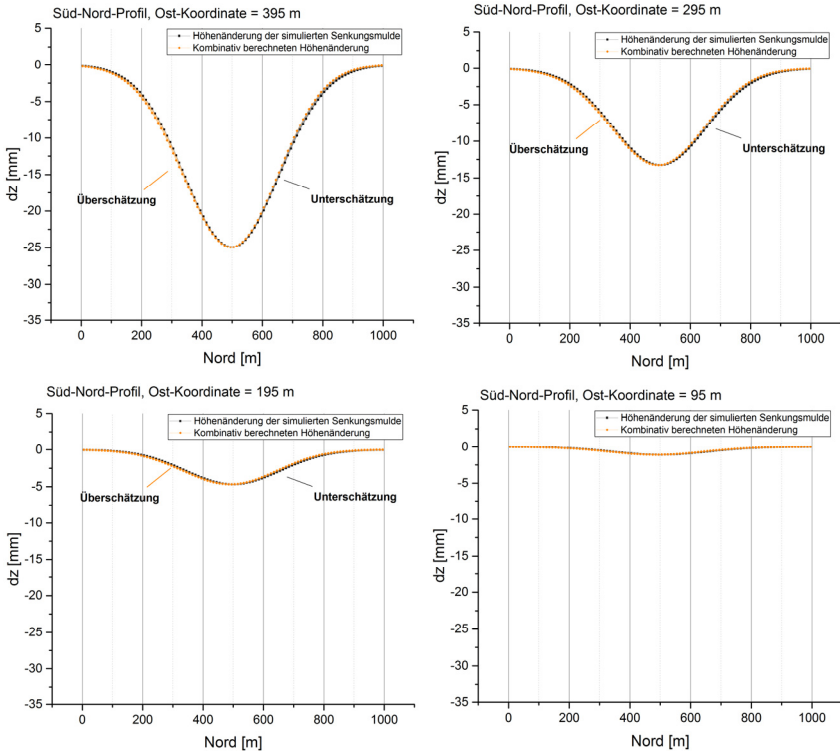


Abbildung 46 Süd-Nord-Profil der wahren und kombinatativ berechneten Höhenänderung in zunehmenden Abständen zur Senkungsmitte

4.3.3 Statistische Unsicherheit

In die Ergebnisse einer kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks gehen die Ergebnisse von zwei unabhängig voneinander durchgeführten Auswertungen der Ascending und Descending LoS-Bewegungen ein. Dadurch wird die Qualität der Ergebnisse auch durch die Qualität der zwei eingegangenen LoS-Bewegungen beeinflusst. Aufgrund der unterschiedlichen Rechenmethoden bei der kombinativen Berechnung kann auch die statistische Qualität der ermittelten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponenten unterschiedlich sein.

Um diesen Unterschied theoretisch abzuleiten, kann das Varianzfortpflanzungsgesetz (Niemeier, 2008) eingesetzt werden. Weisen die benutzten LoS-Messungen von Ascending und Descending jeweils die Varianzen von $s_{LoS,A}^2$ und

$s_{Los,D}^2$ auf, kann die Varianz der nach Formel (4-16) kombinatorisch berechneten Höhenänderung wie folgt abgeleitet werden:

$$s_{d_z}^2 = \left(\frac{a_{O,D}}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}} \right)^2 \cdot s_{Los,A}^2 + \left(\frac{a_{O,A}}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}} \right)^2 \cdot s_{Los,D}^2$$

$$= \frac{a_{O,D}^2 \cdot s_{Los,A}^2 + a_{O,A}^2 \cdot s_{Los,D}^2}{(a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A})^2} \quad (4-25)$$

Gleichfalls kann die Varianz der kombinatorisch berechneten Ost-West-Bewegungskomponente $s_{d_o}^2$ mittels Formel (4-26) errechnet werden.

$$s_{d_o}^2 = \frac{a_{Z,D}^2 \cdot s_{Los,A}^2 + a_{Z,A}^2 \cdot s_{Los,D}^2}{(a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A})^2} \quad (4-26)$$

Mithilfe der Formeln (4-25) und (4-26) kann die starke Abhängigkeit von den Varianzen und den konstellationsbedingten Winkeln erkannt werden. Daraus ergeben sich z. B. die folgenden Fragen:

- Welche der zwei ermittelten Größen könnte bei einer bekannten Kombination der Ascending- und Descending-Konstellation, eine bessere statistische Qualität aufweisen?
- Kann die statistische Qualität der ermittelten Größen durch eine optimierte Datenauswahl verbessert werden?

Um die erste Frage zu beantworten, müssen nur Formel (4-25) und (4-26) miteinander verglichen werden, und zwar nur die beiden Zähler, da die Nenner in beiden Formeln identisch sind. Da der Teil $(a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A})^2$ in den möglichen Wertebereichen des Azimuts der Blickrichtung und des Einfallswinkel nur größer als null sein kann, entscheidet das Vorzeichen der Differenz der beiden Varianzen über die Aussage der Qualität.

$$s_{d_z}^2 - s_{d_o}^2 \sim (a_{O,D}^2 - a_{Z,D}^2) \cdot s_{Los,A}^2 + (a_{O,A}^2 - a_{Z,A}^2) \cdot s_{Los,D}^2$$

$$= \left[(\sin \theta_{i,D} \cdot \sin \alpha_{ald,D})^2 - (\cos \theta_{i,D})^2 \right] \cdot s_{Los,A}^2$$

$$+ \left[(\sin \theta_{i,A} \cdot \sin \alpha_{ald,A})^2 - (\cos \theta_{i,A})^2 \right] \cdot s_{Los,D}^2$$

$$= \left\{ [(\sin \alpha_{ald,D})^2 + 1] \cdot (\sin \theta_{i,D})^2 - 1 \right\} \cdot s_{Los,A}^2 + \left\{ [(\sin \alpha_{ald,A})^2 + 1] \right.$$

$$\cdot (\sin \theta_{i,A})^2 - 1 \left. \right\} \cdot s_{Los,D}^2 \quad (4-27)$$

Die Diskussion über das Vorzeichen der Varianzdifferenz kann hierbei mit der Untersuchung vom Vorzeichen der Terme der jeweiligen Varianzen begonnen werden. Da sich der Wert von $\sin \alpha_{ald}$ nur von 0,978 bis 0,988 bei den möglichen Azimuten von 78° bis 81° variieren kann und somit der Wert $(\sin \alpha_{ald})^2$ zwischen 0,957 bis 0,976 liegt, kann eine Vereinfachung der beiden Terme mit $(\sin \alpha_{ald})^2 \approx 0,976$ erzielt werden, um das minimale θ_i für ein positives Vorzeichen, jeweils für den Term $[(\sin \alpha_{ald})^2 + 1] \cdot (\sin \theta_i)^2 - 1$ zu ermitteln.

$$(0,976 + 1) \cdot (\sin \theta_i)^2 > 1, \theta_i \in [0, \frac{\pi}{2})$$

$$\theta_i > \sin^{-1}(\sqrt{\frac{1}{1,976}}) = 45,35^\circ \quad (4-28)$$

Durch diese Ableitung ergibt sich, dass der Einfallswinkel mindestens $45,35^\circ$ sein muss, um ein positives Vorzeichen des Terms $[(\sin \alpha_{ald})^2 + 1] \cdot (\sin \theta_i)^2 - 1$ zu erhalten. Im Falle von Sentinel-1 ist dieser Einfallswinkel nur selten gegeben. Dies führt dazu, dass die Differenz $s_{d_Z}^2 - s_{d_O}^2$ aus der Summe von zwei Termen mit negativem Vorzeichen besteht. Bei Nutzung von Sentinel-1 Daten sollte die Varianz der kombinativ berechneten Höhenänderung somit in den meisten Fällen kleiner als die der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente sein.

Zur Beantwortung der zweiten Frage könnten anhand der Formel (4-25) und (4-26) generell Maßnahmen gewählt werden, durch die der Nenner $(a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A})^2$ vergrößert und die jeweiligen Zahlen vor der jeweiligen Varianz verkleinert werden. Durch eine Vereinfachung vom Sinus-Wert des Azimuts der Blickrichtung, kann der Wert des Nenners durch $0,976 \cdot (\cos \theta_{i,A} \cdot \sin \theta_{i,A} + \cos \theta_{i,D} \cdot \sin \theta_{i,D})$ angenähert werden. Unter der Bedingung $\theta_i \in [30^\circ, 45^\circ]$ wird dieser Wert bei $\theta_i = 45^\circ$ ein Maximum von 0,976 erreichen und bei $\theta_i = 30^\circ$ Minimum von 0,844. Der Wert nimmt daher mit dem steigenden Einfallswinkel zu. Gleichfalls nehmen die jeweiligen Werte der einzelnen Varianzen bei der ermittelten Höhenänderung mit dem steigenden Einfallswinkel ebenfalls zu, was jedoch die Varianz der ermittelten Höhenänderungen vergrößert. Im Gegensatz dazu wird der Zähler der Varianz der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente bei größeren Einfallswinkeln kleiner.

Um das Zusammenspiel dieser Eigenschaften zu verdeutlichen, werden Formel (4-25) und (4-26) wie folgt umgeschrieben:

$$s_{d_Z}^2 = \left(\frac{a_{O,D}}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}} \right)^2 \cdot s_{LoS,A}^2 + \left(\frac{a_{O,A}}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}} \right)^2 \cdot s_{LoS,D}^2$$

$$= \zeta_{Z,A} \cdot s_{LoS,A}^2 + \zeta_{Z,D} \cdot s_{LoS,D}^2 \quad (4-29)$$

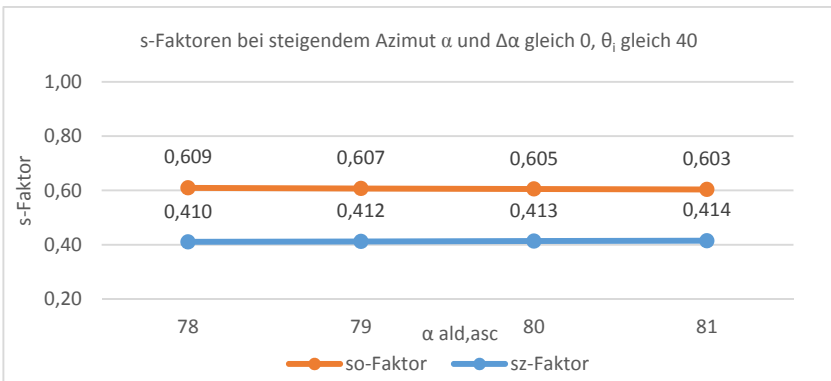
$$s_{d_O}^2 = \left(\frac{a_{Z,D}}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}} \right)^2 \cdot s_{LoS,A}^2 + \left(\frac{a_{Z,A}}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}} \right)^2 \cdot s_{LoS,D}^2$$

$$= \zeta_{O,A} \cdot s_{LoS,A}^2 + \zeta_{O,D} \cdot s_{LoS,D}^2 \quad (4-30)$$

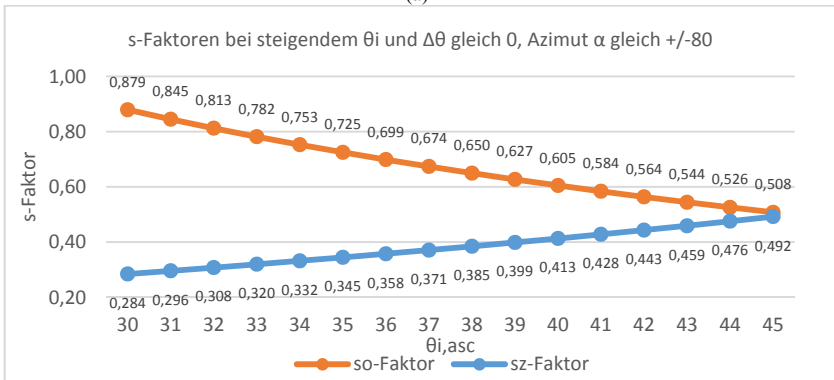
Um die Zusammenhänge leichter beschreiben zu können, werden die Terme vor den jeweiligen Varianzen der LoS-Bewegungen von Ascending und Descending als sog. ζ -Faktoren zusammengefasst. Um kleinere Varianzen für die Ergebnisse der kombinativen Berechnung zu erhalten, müssen die ζ -Faktoren möglichst klein gehalten werden. Unter den s -Faktoren sind hauptsächlich der ζ_Z -Faktor =

$(\frac{a_O}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}})^2$ und der ζ_O -Faktor = $(\frac{a_Z}{a_{Z,A} \cdot a_{O,D} - a_{Z,D} \cdot a_{O,A}})^2$ zu beachten. Die Entwicklungstendenz dieser beiden Faktoren, jeweils in Abhängigkeit von Einfallswinkel und Azimut der Blickrichtung, oder nur dem Einfallswinkel, kann auf den einzelnen Varianzterm der LoS-Bewegungen übertragen werden.

In Abbildung 47 werden die ζ_Z -Faktoren (blaue Kurve) und ζ_O -Faktoren (orange Kurve) jeweils in Abhängigkeit vom Azimut der Blickrichtung (Abbildung 47a) und dem Einfallswinkel (Abbildung 47b) dargestellt. Dabei werden die Differenzen jeweils für die beiden Winkel (+/-80°) nicht separat dargestellt (Abbildung 47 b), weil die ζ -Faktoren keinen negativen Wert, auch nicht in den Untertermen der ζ -Faktoren, annehmen können.



(a)



(b)

Abbildung 47: Darstellung der ζ_Z - und ζ_O -Faktoren bei steigendem Azimut für (a) $\alpha_{ald,A} = \alpha_{ald,D} = 78^\circ, 79^\circ, \dots, 81^\circ$ und $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 40^\circ$, (b) $\alpha_{ald,A} = 80^\circ, \alpha_{ald,D} = 2\pi - 80^\circ$ und $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 30^\circ, 31^\circ, \dots, 45^\circ$

Der ζ_z -Faktor nimmt in beiden Fällen mit steigenden Winkeln zu, wobei der Einfluss infolge Zunahme des Azimuts der Blickrichtung geringfügig ist. Beachtet man zusätzlich noch die Eigenschaften des ε_z -Faktors, der bei einem höheren Azimut zu einer kleinen systematischen Abweichung führt, scheint der ζ_z -Faktor dem zunächst zu widersprechen. Nichts desto trotz bleibt der ζ_z -Faktor bei der Veränderung des Azimuts nahezu konstant, so dass er die Datenauswahlkriterien nicht beeinflusst.

Im Vergleich dazu kann der größere Einfallswinkel mit 45° bereits einen 73% größeren ζ_z -Faktor als der Einfallswinkel mit 30° verursachen. Diese Eigenschaft des ζ_z -Faktors bestätigt die Kriterien der Datenauswahl für die Reduktion der systematischen Abweichung. Im Gegensatz dazu nimmt der ζ_o -Faktor bei beiden Fällen mit steigenden Winkeln ab. Somit widerspricht diese Eigenschaft tendenziell den Kriterien der Datenauswahl zur Erreichung kleinerer systematischer Abweichungen für die Höhenänderung. Da die systematischen Abweichungen die Aussagen der kombinativen Berechnung verfälschen können, sollte bei der Datenauswahl a priori bevorzugt die Reduktion der systematischen Abweichungen berücksichtigt werden.

Die theoretisch größte Varianz der somit kombinativ berechneten Höhenänderung könnte sich hierfür beispielweise bei $\alpha_{ald,A} = 81^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 81^\circ$ und $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 45^\circ$ den Wert von $s_{dZ,max}^2 = 0,5 \cdot s_{LoS,A}^2 + 0,5 \cdot s_{LoS,D}^2$ ergeben, wenn die Varianzen der Eingangsdaten als gleichwertig betrachtet werden. Jedoch beträgt die Varianz der kombinativ berechneten Höhenänderung, bei der sich eine höhere Unsicherheit der Ascending-LoS-Messung am ungünstigsten auswirken kann, zusätzlich durch die maximalen Winkeldifferenzen $0,54 \cdot s_{LoS,A}^2 + 0,26 \cdot s_{LoS,D}^2$ bei $\alpha_{ald,A} = 78^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 81^\circ$ und $\theta_{i,A} = 30^\circ$, $\theta_{i,D} = 45^\circ$. Zudem liegt die theoretisch größte Varianz der kombinativ berechneten Varianz bei $\alpha_{ald,A} = 78^\circ$, $\alpha_{ald,D} = 2\pi - 78^\circ$ und $\theta_{i,A} = \theta_{i,D} = 30^\circ$ mit dem Wert von $s_{dO,max}^2 = 1,05 \cdot s_{LoS,A}^2 + 1,05 \cdot s_{LoS,D}^2$.

4.4 Bestimmung von Bodenbewegungen mittels der kombinativen Berechnung mit zwei parallelen Tracks

Entsprechend der Untersuchung über die Datenverfügbarkeit in Kapitel 4.1.4 ergibt sich, dass für die meisten Gebiete in Europa auch zwei Sentinel-Aufnahmegeometrien derselben Aufnahmerichtung (along-heading) vorliegen. In Anlehnung an die kombinatorische Berechnung (across-heading) in Kapitel 4.3 soll

deshalb in diesem Kapitel ein Ansatz zur Ermittlung von Bodenbewegungskomponenten unter Ausnutzung der Besonderheiten dieser Kombination erarbeitet werden. Hierbei handelt sich um die Ableitung der Höhenänderung und einer Horizontalbewegung in der horizontalen Blickrichtung (projizierte Blicklinie auf der horizontalen Ebene) von einer der beiden Aufnahmegeometrie.

4.4.1 Funktionaler Zusammenhang

In diesem Fall müssen wieder sich räumlich und zeitlich überlappende LoS-Messungen vorliegen, die allerdings in nahezu derselben Aufnahmerichtung aber mit unterschiedlichen Einfallswinkeln aufgenommen wurden. So könnten entweder zwei Ascending-Aufnahmegeometrien oder zwei Descending-Aufnahmegeometrien verwendet werden. Gemäß der allgemeinen Schreibweise des linearen Gleichungssystems zur Bestimmung der Bodenbewegungskomponenten ergibt sich z. B. für zwei Ascending-Aufnahmegeometrien für jeden zu ermittelnden Messpunkt das folgende unterbestimmte LGS (4-31).

$$\begin{matrix} \mathbf{A} & \cdot & \mathbf{x} & = & \mathbf{b} \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\sin \theta_{i,A1} \cdot \sin \alpha_{ald,A1} & -\sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \alpha_{ald,A1} & \cos \theta_{i,A1} \\ -\sin \theta_{i,A2} \cdot \sin \alpha_{ald,A2} & -\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \alpha_{ald,A2} & \cos \theta_{i,A2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_o \\ d_N \\ d_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{LoS,A1} \\ d_{LoS,A2} \end{pmatrix} \quad (4-31)$$

Die geometrische Konstellation dieses Ansatzes ist am Beispiel von zwei Ascending-Aufnahmegeometrien in Abbildung 48 dargestellt.

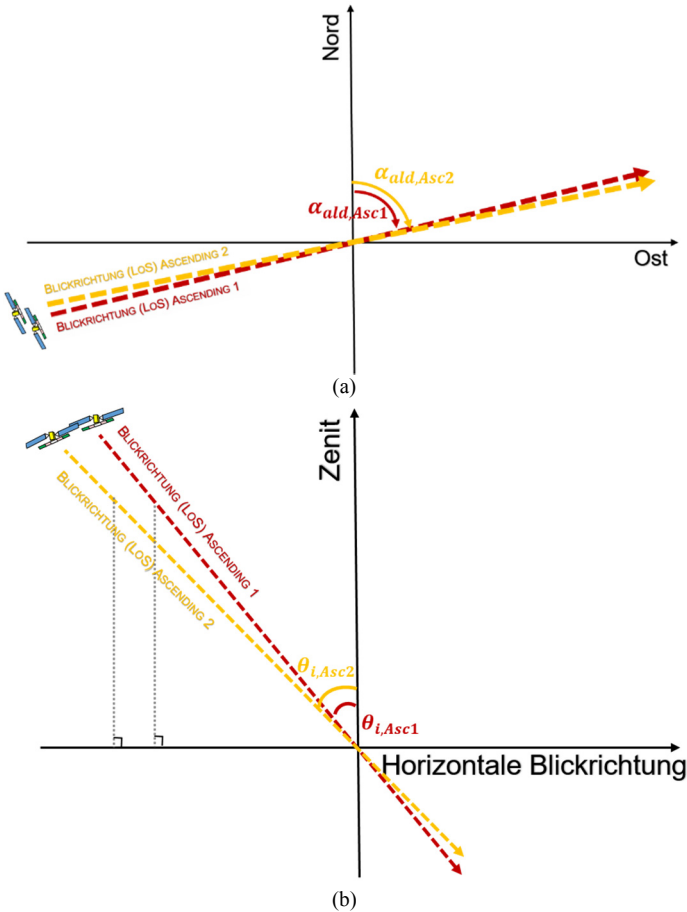


Abbildung 48: Perspektive der Blicklinie von zwei Ascending-Aufnahmen mit verschiedenen Einfallswinkeln in (a) NO-Fläche und (b) ZAz-Fläche (vertikal)

Im Gegensatz zur kombinatorischen Berechnung mit Ascending- und Descending-Aufnahmen weichen hier die Azimute der Blickrichtungen der zwei LoS-Messungen kaum voneinander ab und somit gilt $\alpha_{ald,A1} \approx \alpha_{ald,A2} = \alpha_{ald,A}$. Die Summe $d_N \cdot \cos \alpha_{ald} + d_O \cdot \sin \alpha_{ald}$ in Formel (3-28), womit die Ost-West- und Nord-Süd-Bewegungskomponenten auf die horizontale Blickrichtung projiziert werden, kann unter dieser Annahme für die zwei LoS-Messungen aus derselben Aufnahmerichtung als identisch betrachtet werden: $d_N \cdot \cos \alpha_{ald,A1} + d_O \cdot \sin \alpha_{ald,A1} \approx d_N \cdot \cos \alpha_{ald,A2} + d_O \cdot \sin \alpha_{ald,A2} = d_{Rg}$. Diese Vereinfachung bietet die Möglichkeit, je eine Gleichung (vgl. LGS (4-32)) für die Unbekannten, nämlich die Höhenänderung d_Z und die horizontale Bewegungskomponente in

der horizontalen Blickrichtung d_{Rg} zu bilden. Diese beiden Gleichungen sind mathematisch lösbar, solange die Differenz zwischen den Einfallswinkeln nicht Null beträgt.

$$\begin{pmatrix} -\sin \theta_{i,A1} & \cos \theta_{i,A1} \\ -\sin \theta_{i,A2} & \cos \theta_{i,A2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_{Rg} \\ d_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{LoS,A1} \\ d_{LoS,A2} \end{pmatrix} \quad (4-32)$$

Die Lösung für d_{Rg} und d_Z ergibt sich jeweils durch die Formeln (4-33) und (4-34):

$$d_{Rg} = \frac{\cos \theta_{i,A2} \cdot d_{LoS,A2} - \cos \theta_{i,A1} \cdot d_{LoS,A1}}{\sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2} - \sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1}} \quad (4-33)$$

$$d_Z = \frac{\sin \theta_{i,A2} \cdot d_{LoS,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot d_{LoS,A2}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}} \quad (4-34)$$

In den folgenden Absätzen werden die systematischen Abweichungen und statistischen Unsicherheiten dieses Ansatzes untersucht. Die Diskussion wird auf die ermittelte Höhenänderung fokussiert, welche eine der drei grundlegenden Bewegungskomponenten ist.

4.4.2 Systematische Abweichungen infolge der Modellannahme

Wie bei der kombinatorischen Berechnung mit Ascending- und Descending-Aufnahmen entstehen auch beim Ansatz mit zwei aufnahmerrichtungsgleichen LoS-Messungen durch die Abweichung zwischen der Annahme, dass die Azimute der Blickrichtungen der beiden LoS-Messungen identisch sind, und der Realität die annahmebedingte systematische Abweichung. Sind die horizontalen Blickrichtungen nicht identisch, kann der Azimut-Unterschied durch $\Delta\alpha = \alpha_{ald,A1} - \alpha_{ald,A2}$ ausgedrückt werden. Daraus resultiert eine Abweichung Δd_{Rg} zwischen der wahren horizontalen Bewegungskomponente in der horizontalen Blickrichtung $d_{Rg,A2}$ der zweiten LoS-Messung und der $d_{Rg,A1}$ der ersten LoS-Messung. D. h. statt des LGS (4-32) kann nur ein Gleichungssystem (4-35) mit drei Unbekannten wie folgt gebildet werden:

$$\begin{cases} -d_{Rg,A1} \cdot \sin \theta_{i,A1} + d_Z \cdot \cos \theta_{i,A1} = d_{LoS,A1} \\ -(d_{Rg,A2} + \Delta d_{Rg}) \cdot \sin \theta_{i,A2} + d_Z \cdot \cos \theta_{i,A2} = d_{LoS,A2} \end{cases} \quad (4-35)$$

Wenn $d_{Rg,A2} = d_{Rg,A1} + \Delta d_{Rg}$ ist, kann die Lösung von d_Z nach (4-34) unter Berücksichtigung der Abweichung Δd_{Rg} wie nachfolgend umgeschrieben werden:

$$\begin{cases} -d_{Rg,A1} \cdot \sin \theta_{i,A1} + d_{Z,wahr} \cdot \cos \theta_{i,A1} = d_{LoS,A1} \\ -(d_{Rg,A1} + \Delta d_{Rg}) \cdot \sin \theta_{i,A2} + d_{Z,wahr} \cdot \cos \theta_{i,A2} = d_{LoS,A2} \end{cases}$$

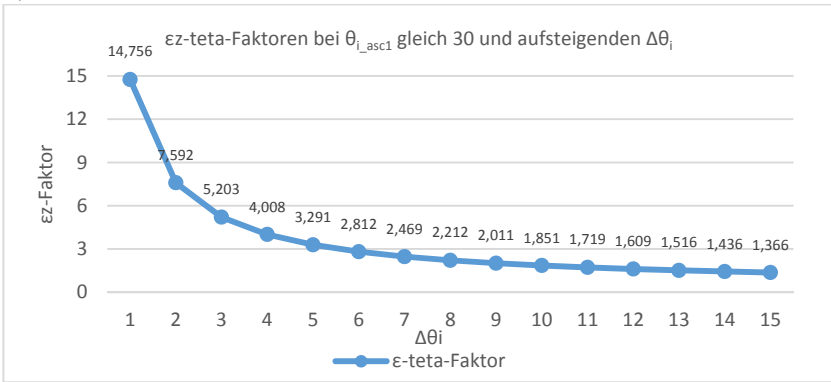
$$\begin{aligned}
& \rightarrow \begin{cases} -d_{Rg,A1} + d_{Z,wahr} \cdot \frac{\cos \theta_{i,A1}}{\sin \theta_{i,A1}} = \frac{d_{LoS,A1}}{\sin \theta_{i,A1}} \\ -(d_{Rg,A1} + \Delta d_{Rg}) + d_{Z,wahr} \cdot \frac{\cos \theta_{i,A2}}{\sin \theta_{i,A2}} = \frac{d_{LoS,A2}}{\sin \theta_{i,A2}} \end{cases} \\
& \rightarrow \Delta d_{Rg} + d_{Z,wahr} \cdot \left(\frac{\cos \theta_{i,A1}}{\sin \theta_{i,A1}} - \frac{\cos \theta_{i,A2}}{\sin \theta_{i,A2}} \right) = \frac{d_{LoS,A1}}{\sin \theta_{i,A1}} - \frac{d_{LoS,A2}}{\sin \theta_{i,A2}} \\
& \rightarrow d_{Z,wahr} = \frac{\sin \theta_{i,A2} \cdot d_{LoS,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot d_{LoS,A2}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}} - \Delta d_{Rg} \cdot \frac{\sin \theta_{i,A2} \cdot \sin \theta_{i,A1}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}} = \\
& d_Z - \Delta d_{Rg} \cdot \frac{\sin \theta_{i,A2} \cdot \sin \theta_{i,A1}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}} \\
& \Delta_{Z,AA} = -\Delta d_{Rg} \cdot \frac{\sin \theta_{i,A2} \cdot \sin \theta_{i,A1}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}} \quad (4-36)
\end{aligned}$$

Die Abweichung Δd_{Rg} ist abhängig von der Differenz der Azimute der Blickrichtung und kann wie folgt abgeleitet werden:

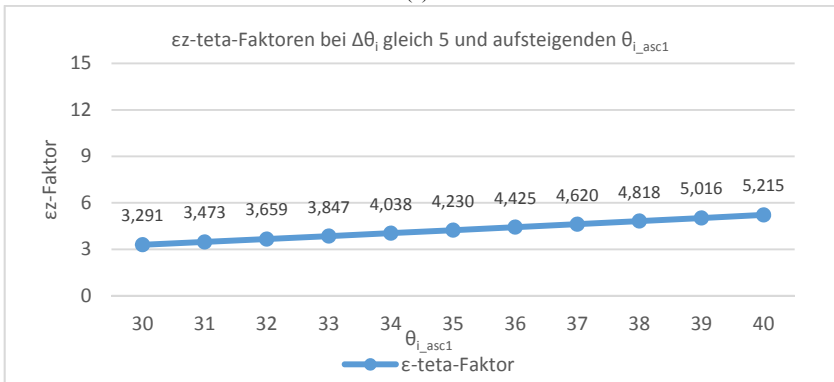
$$\begin{aligned}
& \begin{cases} d_{Rg,A1} = d_N \cdot \cos \alpha_{ald,A1} + d_O \cdot \sin \alpha_{ald,A1} \\ d_{Rg,A2} = d_N \cdot \cos \alpha_{ald,A2} + d_O \cdot \sin \alpha_{ald,A2} \end{cases} \\
& \rightarrow \Delta d_{Rg} = d_{Rg,A2} - d_{Rg,A1} \\
& = d_O \cdot (\sin \alpha_{ald,A2} - \sin \alpha_{ald,A1}) + d_N \\
& \cdot (\cos \alpha_{ald,A2} - \cos \alpha_{ald,A1}) \\
& = 2 \cdot \cos \frac{\alpha_{ald,A1} + \alpha_{ald,A2}}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_{ald,A2} - \alpha_{ald,A1}}{2} \cdot d_O - 2 \\
& \cdot \sin \frac{\alpha_{ald,A1} + \alpha_{ald,A2}}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_{ald,A2} - \alpha_{ald,A1}}{2} \cdot d_N \\
& = 2 \cdot \sin \frac{\alpha_{ald,A2} - \alpha_{ald,A1}}{2} \\
& \cdot \left(d_O \cdot \cos \frac{\alpha_{ald,A1} + \alpha_{ald,A2}}{2} - d_N \cdot \sin \frac{\alpha_{ald,A1} + \alpha_{ald,A2}}{2} \right) \\
& \Delta_{Z,AA} = 2 \cdot \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \cdot \left(d_O \cdot \cos \left(\alpha_{ald,A1} + \frac{\Delta \alpha}{2} \right) - d_N \cdot \sin \left(\alpha_{ald,A1} + \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right) \\
& \cdot \frac{\sin \theta_{i,A2} \cdot \sin \theta_{i,A1}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}} \quad (4-37)
\end{aligned}$$

Formel (4-37) zeigt vor allem die Abhängigkeit zwischen der systematischen Abweichung $\Delta_{Z,AA}$ und den Einfallswinkeln der beiden LoS-Messungen. Dieser Term beeinflusst die Intensität, womit die durch die Azimut-Differenz resultierende systematische Abweichung in die ermittelte Höhenänderung eingeht, wird jedoch nicht von der Fehlerquelle selbst beeinflusst. Hierbei wird dieser Term als $\varepsilon_{Z,teta}$ -Faktor ($\varepsilon_{Z,teta} = \frac{\sin \theta_{i,A2} \cdot \sin \theta_{i,A1}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}}$) bezeichnet und in Abbildung 49 wird der Betrag des $\varepsilon_{Z,teta}$ -Faktors in Abhängigkeit der Differenz und der Größenordnung der zwei Einfallswinkel dargestellt. Um die Diskussion strukturiert und vergleichbar zu gestalten, wird die LoS-Messung mit dem steileren Einfallswinkel mit 1 nummeriert. Somit ist es für diese LoS-Messung auch von einem kleineren Betrag des Azimuts der Blickrichtung im Vergleich zur

LoS-Messung mit dem flacheren Einfallswinkel auszugehen (vgl. Abbildung 32).



(a)



(b)

Abbildung 49: Darstellung des $\epsilon_{Z,teta}$ -Faktors bei (a) $\theta_{i,A1} = 30^\circ, \Delta\theta = 1^\circ, 2^\circ, \dots, 15^\circ$, (b) $\Delta\theta = 5^\circ, \theta_{i,A1} = 30^\circ, 31^\circ, \dots, 40^\circ$

In Abbildung 49a wird der steilere Einfallswinkel auf 30° festgehalten und der Einfallswinkel der anderen LoS-Messung schrittweise um 1° von 31° bis 45° vergrößert. Dadurch wird die Tendenz des $\epsilon_{Z,teta}$ -Faktors bei zunehmenden Einfallswinkeldifferenz ersichtlich. Ferner wird die Einfallswinkeldifferenz in Abbildung 49b auf 5° beibehalten und die Größe des steileren Einfallswinkels von 30° bis 40° mit 1° schrittweise vergrößert, wodurch die Abhängigkeit zwischen dem $\epsilon_{Z,teta}$ -Faktor und der Größenordnung der beiden Einfallswinkel dargestellt wird. Der Betrag des $\epsilon_{Z,teta}$ -Faktors ist somit ein positiver Wert, der mit steigender Einfallswinkeldifferenz abnimmt und mit steigender Größenordnung der Einfallswinkel zunimmt. Insbesondere ist der Abnahmegrad des $\epsilon_{Z,teta}$ -Faktors von der 1° Einfallswinkeldifferenz zu 5° bemerkbar. Der Wert des

$\varepsilon_{Z,teta}$ -Faktors ist von 14,7 auf 3,3 reduziert. In Abbildung 50 wird mittels desselben Bodenbewegungsmodells wie in Kapitel 4.2.2 und 4.3.2 die systematische Abweichung für zwei Einfallswinkelkombination dargestellt. Dabei wird einmal mit 30° und 41° als die Einfallswinkel der zwei LoS-Messungen, und einmal mit 30° und 35° getestet. Um die systematische Abweichung eindeutig darzustellen, wird die Azimut-Differenz auf das mögliche Maximum von 3° angenommen, weil mit kleineren Azimut-Differenz der Fehler ebenfalls kleiner wird.

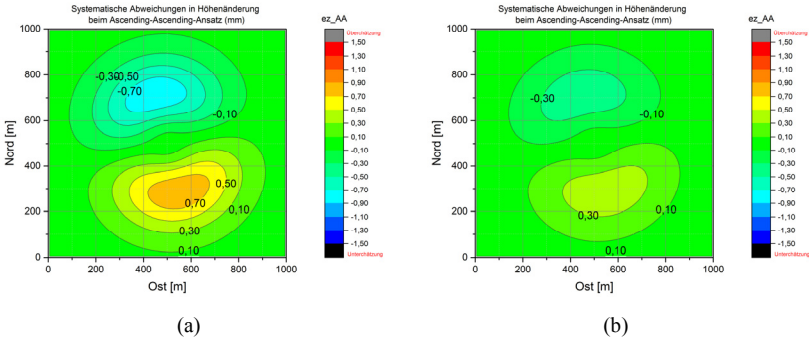


Abbildung 50: Berechnete systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung des Ascending-Ascending-Ansatzes bei einer Azimut-Differenz von 3° und einer Einfallswinkelkombination von (a) 30° und 35° , (b) 30° und 41°

Die zwei weiteren Terme in Formel (4-37) sind abhängig von der Differenz der horizontalen Blickrichtungen der zwei LoS-Messungen, wobei ein Term davon zusätzlich noch von den zwei horizontalen Bewegungskomponenten beeinflusst wird. Der Wert von $\sin \frac{\Delta\alpha}{2}$ nimmt bei einer Zunahme der Azimut-Differenz zu, allerdings nur in einem kleinen Wertebereich von 0 bis 0,026, wenn der Betrag des Azimuts der Blickrichtung lediglich im Bereich von 78° bis 81° schwankt. Der horizontalbewegungsabhängige Term deutet darauf hin, dass die räumliche Verteilung der systematischen Abweichung der räumlichen Orientierung der Blickrichtung folgt. In den Bereichen, wo die Nord-Süd-Bewegungskomponente und die Ost-West-Bewegungskomponente verschiedene Vorzeichen besitzen, d. h. die Horizontalbewegung nach Südosten oder Nordwesten stattfinden, erreicht die systematische Abweichung seinen größten Betrag.

In der weiteren Betrachtung können nun die Unterschiede der zwei Kombinationen verglichen werden, weshalb zunächst in Abbildung 51a unter der Einfallswinkelkombination von 30° und 35° jeweils die systematische Abweichung $\Delta_{Z,AA}$ bei den zwei dafür herangezogenen Ascending-LoS-Messungen mit $\alpha_{ald,A1} = 78^\circ, \alpha_{ald,A2} = 79^\circ$ dargestellt wird. Zum Vergleich wird für die Kombination von zwei Descending-LoS-Messungen mit $\alpha_{ald,D1} = -78^\circ, \alpha_{ald,D2} =$

–80° die systematische Abweichung $\Delta_{Z,DD}$ mit dem gleichen Verfahren berechnet und in Abbildung 51b dargestellt.

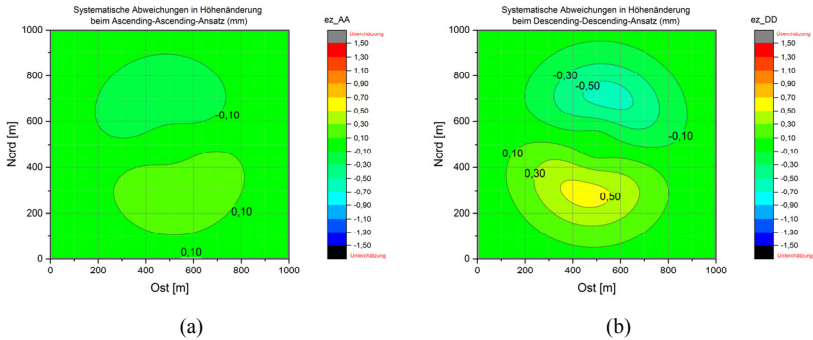


Abbildung 51: Berechnete systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung unter der Einfallswinkelkombination von 30° und 35° bei (a) einer Azimut-Differenz von 1° für Ascending-Ascending, (b) einer Azimut-Differenz von 2° für Descending-Descending

Zunächst ist die Zunahme der systematischen Abweichung durch die Vergrößerung der Azimut-Differenz von Abbildung 51a zu Abbildung 51b erkennen. Bei einer Zunahme der Azimut-Differenz um 1°, wie in Abbildung 51b zu sehen ist, kann die systematische Abweichung unter der relativ ungünstigen Einfallswinkelkombination mit 5° Unterschied bereits zu einer großen Erhöhung kommen. Vergleicht man Abbildung 51a und Abbildung 50a, bei der die Azimut-Differenz unter derselben Einfallswinkelbedingung schon 3° beträgt, wird die Erhöhung der systematischen Abweichung noch deutlicher. Der Vergleich zwischen den beiden Grafiken in Abbildung 51 zeigt darüber hinaus die Beziehung zwischen der Orientierung der fehlerhaften Höhenänderung und der horizontalen Blickrichtung. In den Bereichen, wo die Horizontalbewegung quasi orthogonal zur Blickrichtung steht, werden die systematischen Abweichungen in der ermittelten Höhenänderung größer. Die gelbe Farbe indiziert eine Überschätzung der Senkung in der ermittelten Höhenänderung, während die blaue Farbe eine Unterschätzung darstellt.

Als die einzige Quelle der systematischen Abweichung dieses Ansatzes, spielt die Differenz zwischen den Azimuten der Blickrichtung der beiden LoS-Messungen eine große Rolle, wobei diese Differenz aufgrund der festen Konstellation der Satellitenaufnahmen meistens nicht zu vermeiden ist. Bei der Datenauswahl ist deswegen auch eine größere Differenz der Einfallswinkel bevorzugt, wenn die Differenz der Azimute bereits am kleinsten gewählt wurde. Die Größenordnung der systematischen Abweichung beim simulierten Beispiel ist zwar vergleichbar mit der kombinatorisch berechneten Höhenänderung (vgl. mit

Abbildung 39d und Abbildung 42c), wobei der $\varepsilon_{z,teta}$ -Faktor um circa den Faktor 5 erhöht werden kann, wenn die Einfallswinkeldifferenz auf 1° gewählt wird. Je ungünstiger die Einfallswinkelkombination gewählt wird, desto anfälliger wird das Ergebnis im Vergleich zur kombinativen Berechnung für eine Erhöhung der systematischen Abweichung. Die extrem ungünstige Konstellationskombination mit z. B. $\theta_{i,A1} = 44^\circ$ u. $\theta_{i,A2} = 45^\circ$ bzw. $\Delta\alpha = 3^\circ$ weist die Multiplikation der bewegungsunabhängigen Terme $(2 \cdot \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \cdot \frac{\sin \theta_{i,A2} \cdot \sin \theta_{i,A1}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}})$ auf einen Betrag von ca. 0,74. Bei solchen Fällen zeigt dieser Ansatz keinen Vorteil zur Reduktion der systematischen Abweichung gegenüber der kombinativen Berechnung mit zwei sich kreuzenden Tracks.

4.4.3 Statistische Unsicherheit

Wie bei der kombinativen Berechnung werden bei diesem Ansatz ebenfalls zwei unabhängig voneinander ausgewerteten LoS-Bewegungen zusammengerechnet. Dadurch werden die Ergebnisse durch die Qualität der zwei eingegangenen LoS-Bewegungen beeinflusst.

Nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz kann die Varianz der nach Formel (4-34) ermittelte Höhenänderung wie nachfolgend abgeleitet werden:

$$\begin{aligned}
 s_{dz}^2 &= \left(\frac{\sin \theta_{i,A2}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}} \right)^2 \\
 &\quad \cdot s_{LoS,A1}^2 + \left(\frac{\sin \theta_{i,A1}}{\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2}} \right)^2 \\
 &\quad \cdot s_{LoS,A2}^2 = \frac{\sin \theta_{i,A2}^2 \cdot s_{LoS,A1}^2 + \sin \theta_{i,A1}^2 \cdot s_{LoS,A2}^2}{\left(\sin \theta_{i,A2} \cdot \cos \theta_{i,A1} - \sin \theta_{i,A1} \cdot \cos \theta_{i,A2} \right)^2} \\
 &= \frac{\sin \theta_{i,A2}^2 \cdot s_{LoS,A1}^2 + \sin \theta_{i,A1}^2 \cdot s_{LoS,A2}^2}{(\sin(\theta_{i,A2} - \theta_{i,A1}))^2} \quad (4-38)
 \end{aligned}$$

Mithilfe von Formel (4-38) kann die starke Abhängigkeit zwischen den Varianzen und den Einfallswinkeln erkannt werden. Dabei sind wiederum die Differenz und die Beträge der Einfallswinkel entscheidend. Im Gegensatz zur Varianz der mit sich kreuzenden Tracks kombinativ berechneten Höhenänderung ist hier die Diskussion über die Varianz der ermittelten Höhenänderung übersichtlich. Wird die Nummerierung der zwei eingegangenen LoS-Messungen beibehalten, so dass die steiler blickende LoS-Messung als 1 nummeriert wird, nimmt der Term $\sin(\theta_{i,A2} - \theta_{i,A1})$ mit der steigenden Einfallswinkeldifferenz zu. Dabei kann $\theta_{i,A2} - \theta_{i,A1}$ theoretisch nur ein positiver Wert von 0° bis kleiner als 90° sein. Für die Satellitenkonstellation kann dieser z. B. in einem möglichen Wertbereich von 0° bis 15° liegen. Um eine kleinere Varianz zu erzielen, sollte die Einfallswinkeldifferenz möglichst groß gewählt werden. Die zwei oberen Terme steigen

unabhängig voneinander mit der Zunahme der Einfallswinkelbeträge. Somit sollen die beiden LoS-Messungen mit möglichst steilem Einfallswinkel ausgewählt werden, um die Varianz dadurch klein zu halten. Diese zwei Kriterien stimmen mit den Bedingungen für eine kleinere systematische Abweichung überein. Insbesondere ist es bei der Nutzung von LoS-Messungen, deren Einfallswinkel eine Differenz kleiner als 5° besitzen, zu beachten, dass die systematischen Abweichungen, wenn er aufgrund der Azimut-Differenz vorkommen sollte, besonders groß ist, und gleichzeitig ist die statistische Qualität der somit ermittelten Höhenänderung nur bedingt belastbar.

Hierzu kann die Varianz der mit parallelen Tracks kombinativ berechneten Höhenänderung auch in der gleichen Form der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks wie Formel (4-39) geschrieben werden.

$$s_{d_Z}^2 = \frac{\sin^2 \theta_{i,A2}}{(\sin(\theta_{i,A2} - \theta_{i,A1}))^2} \cdot s_{LoS,A1}^2 + \frac{\sin^2 \theta_{i,A1}}{(\sin(\theta_{i,A2} - \theta_{i,A1}))^2} \cdot s_{LoS,A2}^2$$

$$= \zeta_{Z,A1} \cdot s_{LoS,A1}^2 + \zeta_{Z,A2} \cdot s_{LoS,A2}^2 \quad (4-39)$$

Betrachtet man den vorgegebenen Wertebereich der Einfallswinkel von 30° bis 45° , kann beispielsweise die theoretisch kleinste Varianz der mit parallelen Tracks kombinativ berechneten Höhenänderung den Wert von $s_{d_Z,max}^2 = 7,5 \cdot s_{LoS,A1}^2 + 3,7 \cdot s_{LoS,A2}^2$ bei $\theta_{i,A1} = 30^\circ, \theta_{i,A2} = 45^\circ$ ergeben. Bei einer ungünstigen Konstellationskombination mit einer Einfallswinkeldifferenz von nur 1° können die ζ_Z -Faktoren bereits die Werte um 1000 aufweisen. Somit zeigt dieser Ansatz im Vergleich zur kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks eine deutlich höhere statistische Unsicherheit. Die Größenordnung der ζ_Z -Faktoren bei der günstigsten Konstellation ist hierfür zehnfach höher als die ζ_Z -Faktoren der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks mit der ungünstigsten Konstellation.

5 Durchführung und Analyse von kombinativen Berechnungen mit unterschiedlichen, realen Aufnahmegeometrien zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten

In Kapitel 4.3 und 4.4 wurden zwei Ansätze zur kombinativen Berechnung von Bewegungskomponenten vorgestellt: kombinataive Berechnung mit sich kreuzenden Tracks und parallelen Tracks. Durch eine kombinataive Berechnung mit sich kreuzenden Tracks (vgl. Kapitel 4.3) können die Horizontalbewegungskomponente in der Ost-West-Richtung und die Höhenänderung abgeleitet werden. Die theoretische Untersuchung systematischer Abweichungen infolge der nicht berücksichtigten Nord-Süd-Bewegungskomponente auf diese beiden Komponenten ergab, dass je nach der verwendeten Konstellation die Ost-West-Bewegungskomponente im Idealfall fehlerfrei ermittelt werden kann. Im Vergleich dazu ermöglicht die kombinataive Berechnung mit parallelen Tracks (vgl. Kapitel 4.4) lediglich die Ableitung von Höhenänderungen. Obwohl die so abgeleiteten Höhenänderungen, entsprechend den theoretischen Ableitungen in Kapitel 4.4, bei einer idealen Aufnahmekonstellation von systematischen Einflüssen befreit sein können, ergab sich aber auch, dass die statistische Unsicherheit der abgeleiteten Höhenänderungen sehr groß ist.

Im folgenden Kapitel 5 werden die praktische Durchführung und die programmtechnische Umsetzung der beiden Ansätze zur kombinativen Berechnung für ein Bodenbewegungsgebiet vorgestellt. Dabei werden zur Erzeugung von PSI-Ergebnissen Radardaten von Sentinel-1 verwendet. Hierbei werden anhand der verfügbaren Aufnahmekonstellationen über dem Untersuchungsgebiet verschiedene Kombinationen erprobt, um die daraus entstehenden Einflüsse gegenüberstellen zu können. Die für die PSI-Auswertungen notwendigen Radardaten und deren Konstellationsparameter werden in Kapitel 5.1 ausführlich beschrieben.

Die programmtechnischen Umsetzungen der kombinativen Berechnungen werden in Kapitel 5.2 vorgestellt. Als Eingangsdaten für die kombinativen Berechnungen gelten die getrennt ermittelten PSI-Ergebnisse, und werden am Anfang des Kapitels 5.2 dargelegt. Da die ursprünglichen PSI-Ergebnisse noch durch verschiedene Messunsicherheiten, z. B. Messrauschen der einzelnen PSI-Zeitreihen und lokale anormale Bewegungsverhalten beeinflusst sind, werden verschiedene Ansätze zur Datenbereinigung implementiert (Kapitel 5.2.2), um die Auswirkungen der von Messunsicherheiten belasteten PSI-Zeitreihen zu reduzieren.

Die somit bereinigten PSI-Ergebnisse bilden die Grundlagen für die kombinatorischen Berechnungen, worauf als Ergebnis die berechneten Bewegungskomponenten für die jeweilige Kombination in Kapitel 5.3 dargestellt werden. Für die Zeitreihen der kombinatorisch berechneten Bewegungskomponenten erfolgt eine Trendpolynomausgleichungen (Busch & Linke, 2014). Diese ermöglichen die Ableitung von Maßen über die innere Genauigkeit der kombinatorisch berechneten Bewegungskomponenten. Ferner können die Funktionswerte dieser Trendpolynome benutzt werden, um weniger verrauschte Beträge der Bewegungskomponente für einen bestimmten Zeitraum zu berechnen. Darauf basierend werden verschiedene raumzeitliche Analysen der kombinatorisch berechneten Bewegungskomponenten in Kapitel 5.4 durchgeführt, welche als Grundlagen für die Abschätzung der systematischen Abweichungen in Kapitel 6 dienen.

5.1 Beschreibung der verwendeten Datensätze

Entsprechend der Datenverfügbarkeitsanalyse (vgl. Kapitel 4.1.4) werden die kostenlos verfügbaren Daten aus der Sentinel-1-Mission für das Fallbeispiel verwendet. Die für die PSI-Auswertung verwendeten SLC-Daten von Sentinel-1 wurden über das „Copernicus Open Access Hub²“ ausgewählt und heruntergeladen. Als Ergänzung wurde auch „ASF (Alaska Satellite Facility) Data Search³“ als Datenquelle verwendet, welche dieselben Daten bereitstellt. Das für die PSI-Auswertung notwendige, digitale Höhenmodell stammt aus der Shuttle Radar Topography Mission SRTM-X/-C.

5.1.1 Radardaten

Die Auswahl der Radardatensätze orientiert sich an den zu untersuchenden Aspekten, wie sie in den einführenden Absätzen dieses Kapitels beschrieben werden. Zur Durchführung und Gegenüberstellung der Ergebnisse der zwei kombinatorischen Berechnungen werden mindestens drei zeitlich und räumlich überlappende Datenstapel benötigt. Davon müssen zwei Datensätze aus derselben Aufnahmerichtung mit möglichst großer Einfallswinkeldifferenz für die kombinatorische Berechnung mit parallelen Tracks und einem zusätzlichen Datensatz aus der entgegengesetzten Aufnahmerichtung für die kombinatorische Berechnung mit sich kreuzenden Tracks ausgesucht werden. Die möglichen Testgebiete, für die solche drei Datensätze verfügbar sind, sind in Abbildung 25 durch grüne und blaue

² <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

³ <https://search.asf.alaska.edu/#/>

Farben gekennzeichnet. Hellgrün markierte Bereiche erfüllen diese Datenanforderung nicht.

Ferner müssen im Untersuchungsgebiet Bodenbewegungen im durch die Szenen verfügbaren Zeitraum auftreten. Für diese praktische Untersuchung ist ein Gebiet mit einer Größe von ca. 11 km x 11 km ausgewählt worden, welches alle diese Bedingungen erfüllt und sich im Überschneidungsbereich von vier Sentinel-1 Tracks befindet. Die vier Tracks sind jeweils mit den Nummern der relativen Orbits 139, 37, 15, und 117 gekennzeichnet. In der weiteren Ausführung werden die Datensätze jeweils mit deren Nummern der relativen Orbits (RO) abgekürzt bezeichnet, z. B. RO-139. In Abbildung 52 sind die räumlichen Lagen der oben genannten vier Track flächenhaft dargestellt. RO-37 und RO-139 sind Descending-Aufnahmen und RO-15 und RO-117 Ascending-Aufnahmen. Das Untersuchungsgebiet im Überlappungsbereich der vier Tracks ist in Abbildung 52 mit einem roten Rahmen markiert.

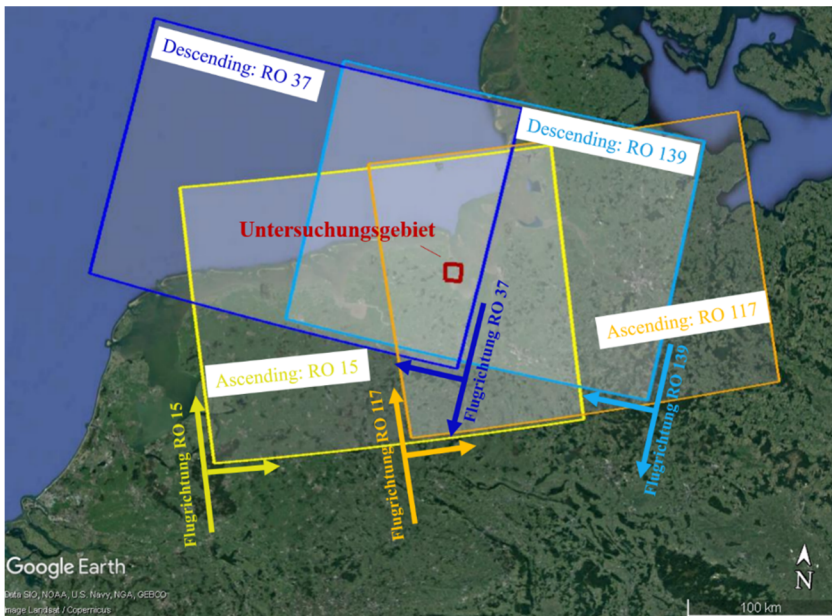


Abbildung 52: Das Untersuchungsgebiet im Überlappungsbereich der vier Tracks

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in den beiden Ascending-Aufnahmen im ersten Teilaufnahmestreifen (IW1, vgl. Abbildung 21a), und zwar im RO-117 auf der Near-Range-Seite, und im dritten Teilaufnahmestreifen (IW3) der RO-15, auf der Far-Range-Seite. Ähnlich sieht die Situation bei den beiden

Descending-Aufnahmen aus. Hier liegt das Untersuchungsgebiet im ersten Teilaufnahmestreifen (IW1) der RO-37, auf der Near-Range-Seite, und im zweiten Teilaufnahmestreifen (IW2) der RO-139 im mittleren Aufnahmebereich. Dies bedeutet, dass die Aufnahmen der RO-117 und RO-37 über dem Untersuchungsgebiet die steileren Einfallswinkel im Vergleich zu den anderen beiden Tracks aufweisen, wobei die Descending-Aufnahme von RO-37 den steilsten Einfallswinkel besitzt. Auf die genauen Eigenschaften der Konstellationen wird in Kapitel 5.1.3 eingegangen.

Für diese praktische Untersuchung werden die Radardaten im SLC-Format⁴ genutzt, und sind damit geeignet für die Auswertung mittels der Gamma Software. In Abbildung 53 sind die verfügbaren Radarszenen der vier Tracks vom Beginn der Sentinel-1-Mission bis Mai 2018 über die Zeit (mit ihren Aufnahmezeitpunkten) dargestellt.

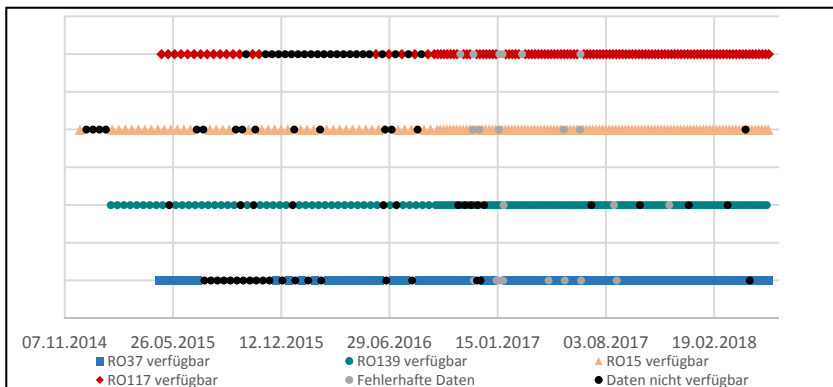


Abbildung 53: Darstellung der verfügbaren und fehlenden Radarszenen der ausgewählten Tracks

Auffällig ist die erhöhte, zeitliche Datendichte ab Oktober 2016 durch die Verfügbarkeit zusätzlicher Sentinel-1B Daten (zeitlicher Szenenabstand beträgt 6 Tage), sowie der unterschiedliche Beginn der Aufzeichnungen der Sentinel-1A Szenen in den vier Tracks. Ausgefallene, nicht aufgezeichnete Aufnahmen sind mit schwarzen Punkten markiert. Die Gründe für den Ausfall von Aufnahmen

⁴ Die üblicherweise bereitgestellten Datenformate beginnen als Level-0, Rohdaten, welche in Level-1, SLC-Daten überführt werden können. Diese werden aus den Rohdaten (raw data) eines SAR-Systems nach der Range-Kompression, Interpretation der Dopplerfrequenz (womit der Einfluss durch die Fluggeschwindigkeit rechenbare Dopplerfrequenz korrigiert wird) und der SAR-Fokussierung (wodurch die vom Entfernungsunterschied zwischen dem Sensor und Rückstreuer innerhalb eines keulenförmigen Radaraufnahmebereiches verursachte Phasenverschiebung korrigiert wird) erstellt (Woodhouse, 2005).

sind vielfältig, wovon einige Ursachen in offiziellen ESA-Dokumentationen angekündigt werden, während in anderen Fällen keine Gründe genannt werden. Hier werden die bis zum Zeitpunkt der Datenrecherche⁵ nicht verfügbaren SLC-Daten, bzgl. der zwei obengenannten Quellen, allgemein als Ausfälle von Aufnahmen bezeichnet.

Ganz selten können sich auch die heruntergeladenen SLC-Daten als fehlerhaft erweisen, wie z. B. durch sog. Fokussierungsfehler. Solche Fehler können erfahrungsgemäß teilweise durch die Intensitätsbilder (Abbildung 54) detektiert werden. Diese SLC-Daten zeigen bei der SLC-Koregistrierung oder spätestens bei der Detektion der PS-Kandidaten mittels der Gamma Software eine niedrige Qualität bzw. führen zu einer Verminderung der PS-Kandidatenanzahl. Diese Szenen sind in Abbildung 53 als graue Punkte gekennzeichnet und werden in dieser Arbeit nicht verwendet.

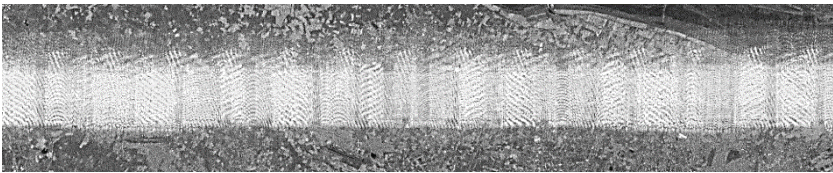


Abbildung 54: Intensitätsbild (Multilook 3 x 1) der Radarszenen am 02.12.2016 aus dem RO-37 als Beispiel des Fokussierungsfehlers

In Abbildung 53 ist zu erkennen, dass Radardaten aus RO-139 und RO-15 über die Zeit von Jan./Feb. 2015 bis Mai 2018 ohne große Datenlücken (von mehr als 30 Tagen) verfügbar sind, während Daten von RO-37 und RO-117 erst ab Mai 2015 zur Verfügung stehen, und zusätzlich jeweils eine große Datenlücke von 142 Tagen (RO-37: von 12.07.2015 bis 19.11.2015), bzw. 214 Tagen (RO-117: von 01.11.2015 bis 03.06.2016) aufweisen. Große Datenlücken bedeuten zunächst Informationsverluste, können darüber hinaus aber auch zu Fehlern in der PSI-Auswertung führen, wie z. B. Phasenabwicklungsfehler (vgl. Kapitel 3.2.3.2). Daher sind die Datensätze aus RO-117 und RO-37 für die PSI-Auswertungen nicht bedenkenlos geeignet. Um den Bedarf an einer dritten unabhängigen Aufnahmerichtung im Hinblick auf die verschiedenen kombinatorischen Berechnungen zu erfüllen, wird der Datensatz aus RO-37, welcher den kleineren datenlosen Zeitraum aufweist, trotzdem verwendet.

Eine Übersicht der nutzbaren SLC-Daten (ohne die fehlerhaften Daten) aus RO-15, RO-139 und RO-37 zeigt Tabelle 4. Die für die PSI-Auswertungen letztlich verwendeten Daten können von diesen Angaben der Szenenanzahl noch ab-

⁵ Finale Datenrecherche im August 2019

weichen, da die Radarszenen noch bezüglich ihrer Qualität für die PSI-Auswertung während des Auswertprozesses getestet und ggf. von einer endgültigen Auswertung ausgeschlossen werden können. Die Bestimmung der endgültigen Szenenanzahl der jeweiligen PSI-Auswertungen wird in Kapitel 5.2.1 erläutert.

Tabelle 4: Übersicht der nutzbaren Radardaten aus RO-15, RO-139 und RO-37

| Tracks | Blickrichtung | Teilstreifen | Datenbeginn | Datenende | Szenenanzahl |
|--------|---------------|--------------|-------------|------------|--------------|
| RO-15 | Ascending | IW2 – IW3 | 03.02.2015 | 30.05.2018 | 137 |
| RO-37 | Descending | IW1 | 30.04.2015 | 01.06.2018 | 118 |
| RO-139 | Descending | IW2 | 31.01.2015 | 27.05.2018 | 134 |

5.1.2 Digitales Höhenmodell

Für die PSI-Auswertung mittels des IPTA-Verfahren der Gamma Software wird ein digitales Höhenmodell (DHM) benötigt. Benutzt wird das kostenfreie und ursprünglich von dem DLR bereitgestellte SRTM-Höhenmodell. Es liegt im Bezugssystem WGS84 (horizontales Datum: WGS 84; vertikales Datum: WGS84, MSL) mit einer Bodenauflösung von 3'' (C-Band) und 1'' (X-Band) vor. Datenlücken in dem höher auflösenden DHM (X-Band) werden durch Daten aus dem C-Band ergänzt und nach der Koordinatentransformation des Höhenmodells auf eine Auflösung von 5 m x 5 m umgerechnet. Zur Anwendung kommt das SRTM-Höhenmodell in einer Gauß-Krüger (3. Zone) Abbildung mit Bessel-Ellipsoid.

5.1.3 Radarkonstellation

Die Informationen über die Einfallswinkel liegen in den SLC-Datenpaketen als „Geolocation Grid“ (Vincent, et al., 2019) innerhalb der jeweiligen „annotations“-Dateien der Teilaufnahmestreifen vor. Durch die Verarbeitung mittels der von der ESA zur Verfügung gestellten Software „Sentinel Application Plattform (SNAP)“, welche Analysewerkzeuge für Daten der Sentinel-Mission umfasst, können die punktuell vorhandenen Angaben über die Einfallswinkel in ein flächenhaftes Raster („Tie-point Grid“) durch lineare Interpolation überführt werden (SNAP, 2019).

Die Einfallswinkel der jeweiligen Tracks im Untersuchungsgebiet sind in Abbildung 55 dargestellt. Diese Angaben beziehen sich auf die Masterszenen der jeweiligen Datenstapel. Darin ist zu erkennen, dass der Descending-Track RO-

139 und der Ascending-Track RO-15 ähnliche Einfallswinkel mit ca. 1° Unterschied besitzen, während der Descending-Track RO-37 kleinere Einfallswinkel aufweist und ca. 9° steiler als RO-139 auf das Untersuchungsgebiet blickt.

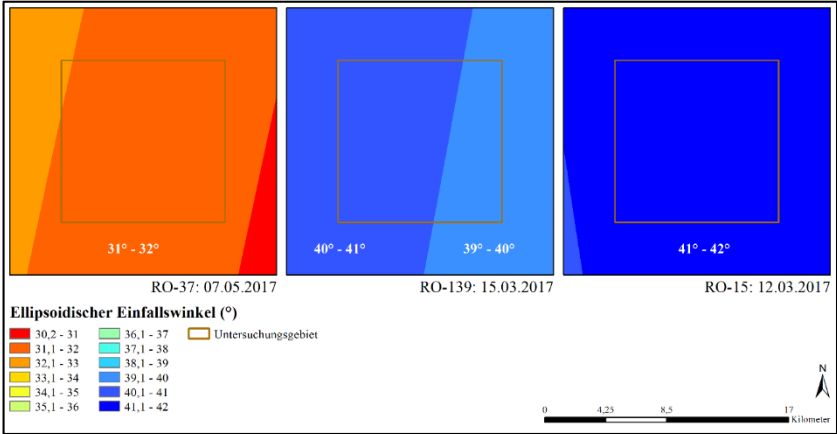


Abbildung 55: Interpolierte Darstellung der jeweiligen Einfallswinkel der verwendeten Tracks über dem Untersuchungsgebiet

Die Azimute der Blickrichtungen werden anhand der Eckpunkte der jeweiligen Bursts berechnet, wobei die Eckkoordinaten zunächst in das genutzte Gauß-Krüger-Koordinatensystem (vgl. Kapitel 5.1.2) umgewandelt werden. Die Azimute der Blickrichtungen werden für die nördliche und südliche Kante des betroffenen Bursts der jeweiligen Masterszenen ermittelt (vgl. Kapitel 3.3.1) und sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Azimute der Blickrichtung der genutzten Datenstapel

| Tracks | Blickrichtung | Teilstreifen | Burst | Azimut der Blickrichtung (°) | |
|--------|---------------|--------------|-----------------------|------------------------------|----------------|
| | | | | Nördliche Kante | Südliche Kante |
| RO-15 | Ascending | IW2 | 4 | 81,1 | 81,1 |
| RO-37 | Descending | IW1 | 7 | -77,7 | -77,7 |
| RO-139 | Descending | IW2 | 1 (südliche Szene) | -79,3 | -79,3 |

Innerhalb eines Bursts variieren die ermittelten Azimute der nördlichen und südlichen Kanten in einem Wertebereich um weniger als 0,03°. Daher können die Azimute der Blickrichtung innerhalb eines Bursts als konstant betrachtet werden. Die Angaben der Azimute in Tabelle 5 sind auf 0,1° gerundet. Die Azimute der

Blickrichtung der drei Tracks weisen untereinander Differenzen von $1,6^\circ$ bis $3,4^\circ$ auf, wodurch ein Einfluss auf die Entstehung entsprechender systematischer Abweichungen und statistischer Unsicherheiten getestet werden kann.

5.2 Prozessablauf der kombinativen Berechnungen

Entsprechend der in Kapitel 4.3 erläuterten Theorie können Höhenänderungen und die Horizontalbewegungen in Ost-West-Richtung kombinativ und basierend auf Ergebnissen von getrennt durchgeführten PSI-Auswertungen (für sich kreuzende Ascending- und Descending-Datenstapel) berechnet werden. Der Berechnungsablauf zur Ableitung von Höhenänderungen und der Ost-West-Bewegungen ist in Abbildung 56 dargestellt.

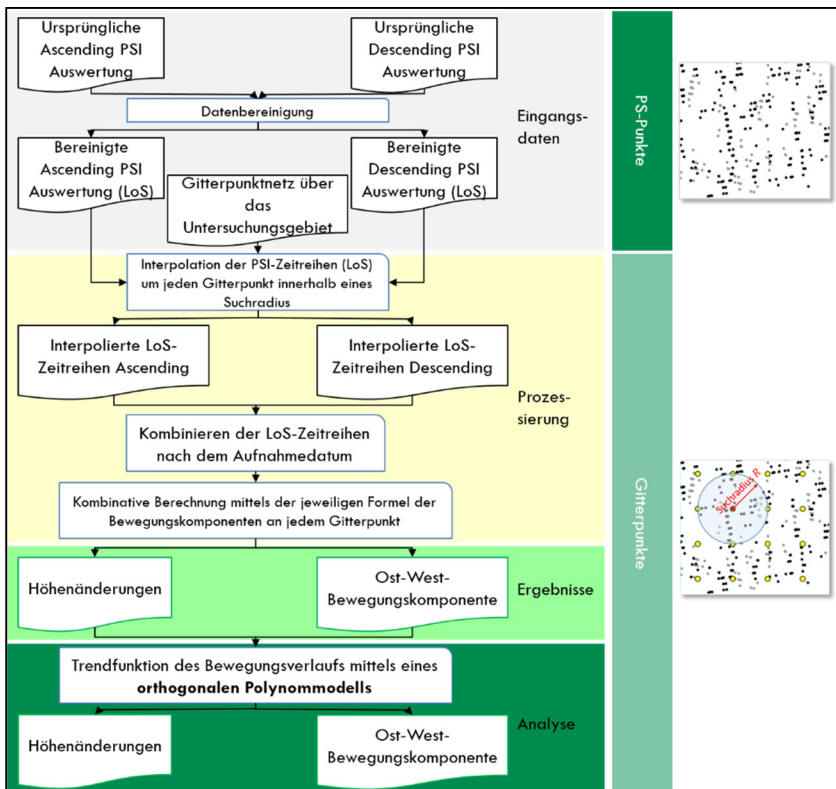


Abbildung 56: Prozesskette der kombinativen Berechnung von Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponente (mit zwei sich kreuzenden Tracks)

Da die Ergebnisse der getrennt durchgeführten PSI-Auswertungen noch durch verschiedene Messunsicherheiten beeinflusst sind, sollen sie in einem ersten Prozessschritt „Datenbereinigung“) untersucht werden. Zu diesen Unsicherheiten gehört z. B. das Messrauschen in den PSI-Zeitreihen und ein mögliches, lokal anomales Bewegungsverhalten. Um die Qualität der Ergebnisse einer kombinativen Berechnung zu erhöhen, werden die von Messunsicherheiten beeinflussten PSI-Zeitreihen durch verschiedene Ansätze der Datenbereinigung vor der weiteren Verwendung detektiert und aussortiert (Kapitel 5.2.2).

Im Zuge der „Kombination“ der bereinigten PSI-Ergebnisse muss sowohl die räumliche Zuordnung der beiden punkthaften PSI-Ergebnisse als auch die Zuordnung der LoS-Bewegungen über einen gemeinsamen, gleichen Zeitraum erfolgen. Da die aus Ascending- und Descending-Aufnahmerichtungen ermittelten PS-Punkte nicht durch dieselben Rückstreucentren entstehen, obwohl sie in manchen Fällen gleichen Objekten zugeordnet werden könnten, können hierbei keine räumlichen Eins-zu-eins-Korrespondenzen zwischen den PS-Punkten der beiden Blickrichtungen anhand der geokodierten Punktlagen hergestellt werden. Um die beiden LoS-Messungen trotzdem kombiniert zu berechnen, wird für das Untersuchungsgebiet ein Gitternetz (Grid) festgelegt, welches am genutzten kartesischen Koordinatensystem orientiert ist. Die Gitterpunkte besitzen entlang der Ost-West- und Nord-Süd-Richtungen gleiche Abstände S .

Diese Gitterpunkte stellen im Datenverarbeitungsprozess die lagemäßig definierten Träger aller vorhandenen und berechneten Informationen dar. Aus den Zeitreihen der LoS-Bewegungen der PS-Punkte, die sich in einer durch den Suchradius R_d definierten, unmittelbaren Nähe jedes Gitterpunktes befinden, werden für jeden Gitterpunkt die für ihn repräsentativen Zeitreihen der LoS-Bewegungen (getrennt für die Ascending- und die Descending-Richtung) mittels einer gewichteten Flächeninterpolation der Messwerte jedes Aufnahmedatums berechnet. Hierzu wird eine Inverse Distanzwichtung (IDW) als Interpolationsverfahren verwendet. Als Gewichtungsfaktor dient der Reziprokwert der quadratischen Distanz zwischen Gitterpunkt und PS-Punkt. Damit wird, innerhalb des Suchradius R_d , der Einfluss weiter entfernt liegender PS-Punkte relativ schnell reduziert. Eine noch höhere Gewichtungspotenz wird nicht verwendet, weil dadurch die Auswirkung lokaler Anomalien in der Gitterpunktnähe auf das Interpolationsergebnis stärker hervorgehoben werden kann.

Die so für jeden Gitterpunkt durch Interpolation berechneten LoS-Zeitreihen der Ascending- und Descending-Richtungen bilden die Grundlage für die kombinatorische Berechnung von Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen. Die LoS-Messwerte dieser je zwei interpolierten Ascending- und Descending-Zeitreihen

eines Gitterpunktes unterscheiden sich jedoch noch entsprechend dem ursprünglichen Aufnahmedatum. Für den Track RO-139 und RO-15 besteht ein ΔT von 3 Tagen, d. h. die Descending-Aufnahme erfolgte jeweils 3 Tage früher als die zeitlich korrespondierende Ascending-Aufnahme. Für die Kombination RO-15 und RO-37 beträgt der Zeitversatz -2 Tage, was bedeutet, dass die Descending-Szene 2 Tage später als die korrespondierende Ascending-Szene aufgenommen wurde. Für die kombinatorische Berechnung werden diese geringen zeitlichen Unterschiede vernachlässigt und angenommen, dass ein Descending-Wert dem ΔT Tage versetzt aufgenommenen Ascending-Wert entspricht. Dieser Wert ΔT ist für eine gewählte Track-Kombination konstant. Messwerte eines Datums einer Aufnahmerichtung, für die, um den Wert ΔT verschoben, kein Messwert in der anderen Aufnahmerichtung vorliegt, bleiben in den weiteren Berechnungen unberücksichtigt.

Das PSI-Ergebnis stellt eine relative Messung bzgl. des ausgewählten Referenzzeitpunktes dar, welcher dem Aufnahmedatum der Referenzszene (meistens auch der Masterszene) entspricht. Um die kombinatorische Berechnung durchzuführen, müssen sich die LoS-Messungen der zwei Blickrichtungen auf denselben Referenzzeitpunkt beziehen. Hierbei werden die LoS-Bewegungen auf die ersten korrespondierenden Zeitpunkte der Ascending- und Descending-LoS-Zeitreihen in Bezug gestellt.

Die kombinatorische Berechnung erfolgt nach den obengenannten zwei Zuordnungsschritten. Entsprechend der Formel (4-15) und (4-16) werden die Ost-West-Bewegungskomponente und die Höhenänderung anhand der somit angeordneten Wertepaare der LoS-Messungen aus Ascending und Descending berechnet. Dabei wird der kleine zeitliche Unterschied von z. B. 3 Tagen zwischen den Ascending- und Descending-Aufnahmen vernachlässigt und die Messwerte der Ascending-Zeitreihen werden dem entsprechenden Messdatum der Descending-Messdaten zugeordnet.

Die einzelnen Messwerte der so berechneten Zeitreihen (für die Höhenänderungen und die Ost-West-Bewegungen) sind trotz der gitterpunkt-basierten Interpolation verrauscht. Aus diesem Grund erfolgen für die kombinatorisch berechneten Zeitreihen der Höhenänderung und Ost-West-Bewegungskomponente Trendpolynomgleichungen (Busch & Linke, 2014). Diese ermöglichen die Ableitung von Maßen über die innere Genauigkeit der kombinatorisch berechneten Bewegungskomponenten. Ferner können die Funktionswerte dieser Trendpolynome, welche eine höhere statistische Genauigkeit als die ursprünglichen, kombinatorisch berechneten Zeitreihenwerte besitzen, benutzt werden, um z. B. weniger verrauschte und für weitere Untersuchungen benötigte Höhenänderungsdifferenzen

zu berechnen. Die Diskussion der statistischen Qualität der kombinativen berechneten Bewegungskomponenten wird mithilfe der Trendpolynomausgleichung durchgeführt.

Derselbe Prozessverlauf kann auch für die kombinatorische Berechnung mit parallelen Tracks durchgeführt werden, wobei somit nur Höhenänderungen berechnet werden. Detailliert wird der Prozess in Abbildung 57 dargestellt.

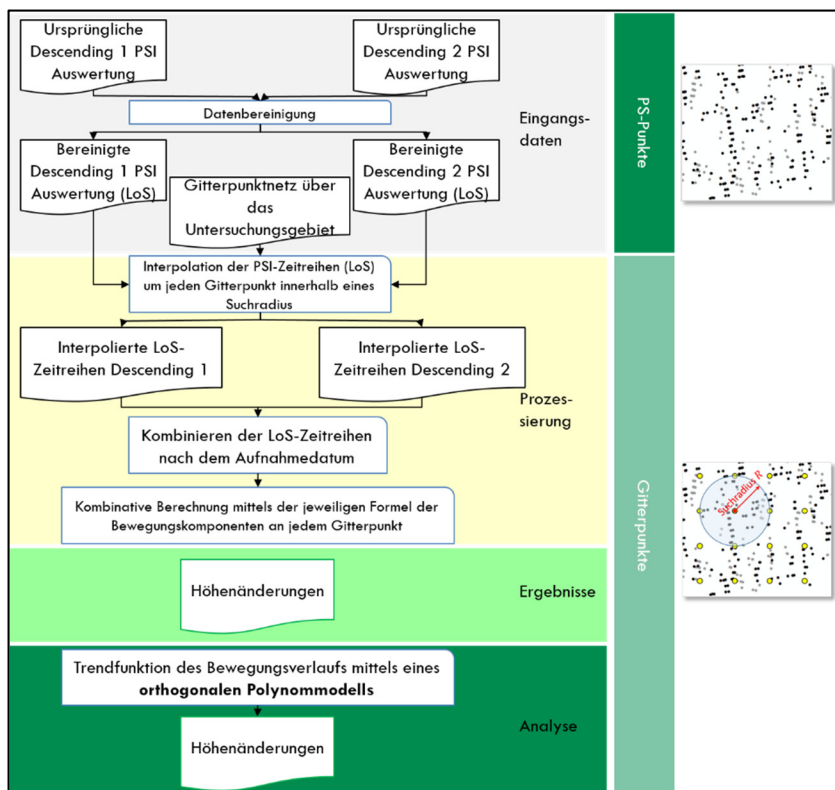


Abbildung 57: Prozesskette der kombinativen Berechnung von Höhenänderungen (mit zwei parallelen Tracks)

5.2.1 PSI-Ergebnisse als Eingangsdaten

Wie in den vorherigen Ausführungen über die PSI-Auswertungen bereits erwähnt, wird die Berechnung mittels des Interferometric Point Target Analysis (IPTA) Verfahrens (Wegmüller, 2005) durchgeführt. Hierfür wird die GAMMA SAR and Interferometry Software (GAMMA Software) der Firma GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG (Schweiz) verwendet.

Die Sentinel-1 Daten lagen durch das Copernicus-Programm als SLC-Daten (Level-1 Daten) vor (Kapitel 5.1.1). Von den in Tabelle 4 umfassten Radarszenen werden die überlappenden Zeiträume von 04/2015 – 05/2018 der drei Radardatenstapel als die Grundlagen für PSI-Auswertung verwendet. Die genauen Zeiträume der jeweiligen Auswertungen werden in Tabelle 6 aufgelistet. Anschließend erfolgt die exakte Koregistrierung aller Szenen jedes Stapels zu einer Masterszene, welche die räumliche Überlagerung aller Szenen aus einem Track realisiert. Die Auswahl einer Masterszene folgt mehreren Kriterien. Die Masterszenen verfügen zunächst sowohl über eine kurze zeitliche als auch räumliche Basislinie im jeweiligen Datenstapel (vgl. Anhang II), welche die Voraussetzung für die Verminderung der zeitlichen und räumlichen Dekorrelation ist. Die Masterszene muss zusätzlich eine relativ hohe durchschnittliche Kohärenz über deren gesamten Datenstapeln besitzen. Mittels der am IGMC entwickelten Verfahren zur Abschätzung der Stapelkohärenz kann für jede Radarszene im Datenstapel die mittlere Kohärenz zu anderen Szenen ermittelt werden, wodurch hauptsächlich die geometrischen, zeitlichen Dekorrelationseffekte bzw. der Dekorrelationseffekt aufgrund der Unterschiede der Dopplerzentren (Hanssen, 2001) (Ge, 2010) berücksichtigt werden. Darüber hinaus sollte die Masterszene auch durch die DHM-Koregistrierung als geeignet erwiesen werden. Ein auf die Masterszene koregistriertes DHM ist für die SLC-Koregistrierung der Sentinel-1-Daten mittels GAMMA Software benötigt (Wegmüller, et al., 2016) (GAMMA Remote Sensing, 2017). Zum Schluss sollte die Masterszene möglichst geringe Beeinflussung durch atmosphärische Effekte beinhalten, welche durch eine selektive Recherche über die Wetterinformationen zu bewerten ist.

Nach den obengenannten Kriterien wurden die Szenen des RO-15-Datenstapels auf die Szene vom 12.03.2017 koregistriert, die Szenen des RO-139-Datenstapels auf die Szene vom 15.03.2017, und die Szenen des RO-37-Stapels auf die Szene vom 07.05.2017. Hierbei wurde ein identisches SRTM-Oberflächenmodell, Raster resampling 5 m, ins Radarsystem des jeweiligen Stapels überführt und für die SLC-Koregistrierungen eingesetzt. Die in Tabelle 4 angegebenen Szenen wurden somit in den jeweiligen Stapeln übereinander geführt.

Die PSI-Auswertungen erfolgten mit dem GAMMA Modul IPTA. Zunächst werden die PS-Kandidaten mittels der Kriterien der spektralen Diversität (eng. Spectral diversity) und Variabilität der Intensität (eng. power variability) detektiert (Wegmüller, 2005). Da das Untersuchungsgebiet relativ ländlich geprägt ist, wird ein Rückstreuer als PS-Kandidat aufgenommen, sobald er eine der zwei Kriterien erfüllt, wodurch eine Erhöhung der Anzahl von PS-Kandidaten bzw. PS-Punkten zu erwarten ist. Darüber hinaus können einzelne Radarszenen einen negativen Einfluss auf die Detektion von PS-Kandidaten ausüben. Ursächlich

dafür können stärkere Dekorrelationen, z. B. infolge atmosphärischer Einflüsse oder Schneebedeckung, zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt sein. Hierbei werden die bei der Detektion von PS-Kandidaten herausgenommen Szenen in Tabelle 6 angegeben.

Tabelle 6: herausgenommene Radarszenen bei der Detektion der PS-Kandidaten

| | Ausgewerteter Zeitraum | herausgenommene Szenen für die Detektion der PS-Kandidaten | Szenenanzahl der Auswertung |
|--------|-------------------------|--|-----------------------------|
| RO-15 | 28.04.2015 – 30.05.2018 | 28.06.2017, 22.07.2017 | 129 |
| RO-37 | 30.04.2015 – 01.06.2018 | 30.06.2017, 09.12.2017 | 116 |
| RO-139 | 25.04.2015 – 27.05.2018 | 15.11.2015, 10.12.2017 | 126 |

Die PSI-Auswertung mittels des IPTA Verfahrens benötigt darüber hinaus eine Referenzszene und einen Referenzpunkt. Voraussetzung für eine erfolgreiche PSI-Analyse ist zum einen die Wahl einer geeigneten Referenzszene, welche möglichst unbeeinflusst von atmosphärischen Einflüssen ist. Zum anderen ist die Wahl eines Referenzpunktes entscheidend, weil er als der Anschlusspunkt für die PSI-Auswertung dient. Bei der PSI-Auswertung wird deshalb angenommen, dass keine Bewegung und kein Höhenfehler am Referenzpunkt aufgetreten sind, somit muss der Referenzpunkt:

- sich in einem bodenbewegungsfreien Gebiet befinden,
- möglichst höhenfehlerfrei sein⁶,
- möglichst in der Nähe des zu untersuchenden Bewegungsgebietes liegen.

Für die kombinatorische Berechnung sollen sich die jeweiligen Referenzpunkte der eingegangenen PSI-Ergebnisse zusätzlich möglichst nah zueinander befinden, wodurch die möglichen relativen Bewegungen bzw. die Höhenfehlerdifferenzen zwischen den Referenzpunkten, und die dadurch verursachte Abweichung zwischen den PSI-Ergebnissen vermieden werden können. Somit werden die Referenzpunkte für die drei Auswertungen in einer Ortschaft, die ca. 6 km vom Bewegungsschwerpunkt entfernt ist, ausgewählt. Die Referenzpunkte sind voneinander ca. 110 m bis 280 m entfernt.

Als Ergebnis einer PSI-Auswertung erhält man für jeden PS-Punkt den zeitlichen Bewegungsverlauf in LoS-Richtung im Zeitraum zwischen der ersten und letzten Aufnahme eines Datenstapels. Im Untersuchungsgebiet konnten 75.064 PS-

⁶ Der Referenzpunkt einer PSI-Auswertung mittels IPTA-Verfahren übernimmt den Höhenwert aus dem verwendeten Höhenmodell. Daher muss dieser Höhenwert der tatsächlichen Höhe des Rückstreucentrums des Referenzpunktes entsprechen.

Punkte für den RO-15-Datenstapel mit 129 Szenen (129 Messzeitpunkten im Zeitraum 28.04.2015 – 30.05.2018) ermittelt werden, 73.100 für den RO-139-Datenstapel mit 126 Szenen (126 Messzeitpunkten im Zeitraum 25.04.2015 – 27.05.2018), bzw. 53.405 für den RO-37-Datenstapel mit 116 Szenen (116 Messzeitpunkten im Zeitraum 30.04.2015 – 01.06.2018). Die LoS-Bewegungsraten (mm/Jahr) der jeweiligen PSI-Ergebnisse werden in Abbildung 58 dargestellt.

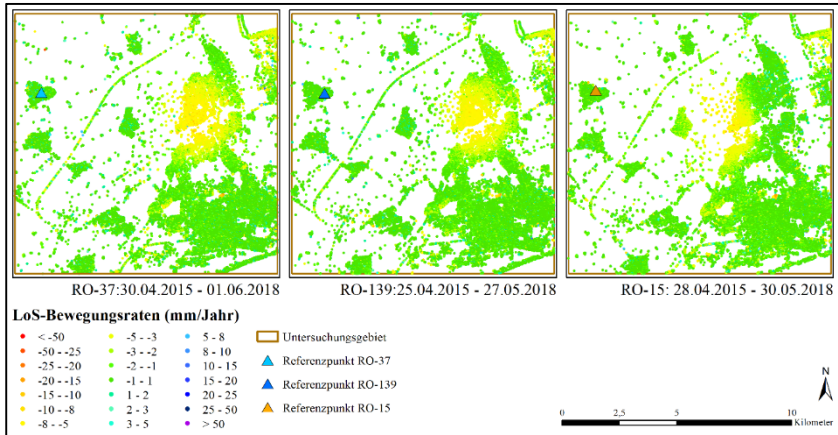


Abbildung 58: LoS-Bewegungsraten (mm/Jahr) der PSI-Ergebnisse aus den RO-37-, RO-139- und RO-15-Datenstapeln

Durch den Vergleich der LoS-Bewegungsraten ist zu erkennen, dass sich der vom Ascending-Datenstapel (RO-15) ermittelte LoS-Bewegungsbereich leicht westlich von den durch die Descending-Datenstapel ermittelten LoS-Bewegungsbereichen befindet. Zwischen den Descending-Ergebnissen ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen, wobei die vom RO-139-Datenstapel erfasste LoS-Bewegung, von der räumlichen Ausbreitung und den Beträgen her, geringfügig kleiner als die vom RO-37 erfasste ist.

Die visuelle Gegenüberstellung der LoS-Bewegungen aus verschiedenen Aufnahmekonstellationen ist zur Vergleichbarkeit allerdings nicht als Äquivalent von erfassten Bodenbewegungen zu betrachten, weil die Vektoren der Blicklinien unterschiedlich sind. Um die PSI-Ergebnisse vergleichbar darzustellen, müssen die LoS-Bewegungen zunächst auf eine identische Dimension umgerechnet werden. Hierbei werden die LoS-Bewegungen mittels des in Kapitel 4.2 erläuterten Verfahrens in Höhenänderungen umgerechnet. Die sich darauf bezogenen Höhenänderungsraten sind in Abbildung 59 dargestellt.

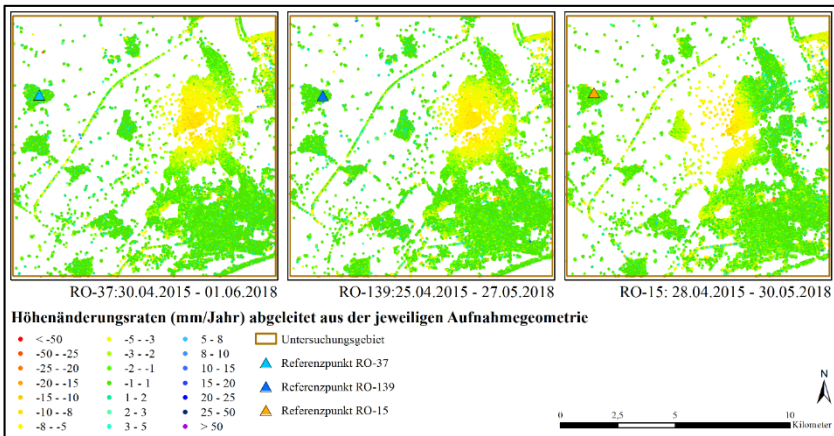


Abbildung 59: Höhenänderungsraten (mm/Jahr) der PSI-Ergebnisse aus den RO-37-, RO-139- und RO-15-Datenstapeln

Die für die jeweils einzelne Aufnahmegeometrie umgerechneten Höhenänderungen in Abbildung 59 stimmen mit der generellen Modellvorstellung (vgl. Abbildung 29) überein, dass es hierbei sich um ein Senkungsgebiet handelt, in welchem auch Horizontalbewegungen aufgetreten sind. Die Bereiche südlich, wie auch westlich der Senkungserscheinung sind die PS-Punkte von tiefgrüner Farbe geprägt, welche eine durchschnittliche Höhenänderungsrate gegen Null entsprechen. Ebenfalls wie in der Modellvorstellung zeigt daher die Richtung der Horizontalbewegungen zum Senkungsschwerpunkt, so dass sich die von RO-15 erfasste Senkungsstruktur mehr nach Westen ausbreitet (vgl. Abbildung 29a). Zwischen den Ergebnissen von RO-139 und RO-37 sind weiterhin keine signifikanten Unterschiede zu erkennen.

Zudem ist bemerkbar, dass die PSI-Ergebnisse noch relativ verrauscht sind und lokale Anomalien enthalten. Hierbei wird die Erfassung der flächenhaften Bodenbewegungen als Aufgabe vorgenommen, dementsprechend sind solche lokale Bewegungsvorgänge, welche nur von einzelnen PS-Punkten gezeigt werden und deren Ursachen lokal eingeschränkt oder sogar rauschbedingt sind, für die weiteren Untersuchungen nicht von Interesse. Um die Einflüsse von solchen PSI-Zeitreihen bei der kombinatorischen Berechnung zu reduzieren, werden zusätzlich Bereinigungsschritte durchgeführt, wodurch sie von den gesamten PSI-Ergebnissen detektiert werden.

5.2.2 *Bereinigung der PSI-Ergebnisse*

Zur Bereinigung von PSI-Ergebnissen wurden verschiedenen Verfahren in Busch et al. (2018) implementiert. In Xi (2017) wurden ebenfalls Ansätze zur Detektion von unterschiedlichen Anomalien ausführlich vorgestellt. Für diese Arbeit werden gemäß dem Messungsziel die folgenden drei Bereinigungs-schritte zur Detektion von drei Sorten von Anomalien, die die Qualität der kombi-nativen Berechnungen hauptsächlich gefährden könnten, durchgeführt:

1. Detektion von PS-Zeit-reihen mit höheren Standardabweichungen für eine Beobachtung in LoS (oberhalb der 99%-Grenze, ca. $\bar{s}_0 + 2,57 \cdot s_{\bar{s}_0}$) nach einer Trendermittlung mit einem bestangepassten Polynom-modell für jede PSI-Zeit-reihe (Busch, et al., 2018).
2. Überprüfung der räumlichen Ähnlichkeit der Ergebnisse, d. h. Bewe-gungen bzw. Bewegungsraten benachbarter PS-Punkte, anhand einer Clusteranalyse nach dem von Xi (2017) vorgestellten Verfahren und mit der Betrachtung von mindestens 8 Nachbarn.
3. Detektion von starken und abrupten Messwertänderungen in PSI-Zeit-reihen, die aufgrund eines Phasenabwicklungsfehlers entstehen könn-ten.

Der erste Ansatz sollte die Zeit-reihen, welche eine starke Messwert-schwankung um die Trendkomponente besitzen, herausfinden. Solche Zeit-reihen zeigen eine größere statistische Unsicherheit über den gesamten Zeitraum, und können bei ungünstigen Fällen die Varianz der betroffenen gitterbasierten Zeit-reihe erhöhen, wodurch die statistische Unsicherheit der kombi-nativ berechneten Bewegun-gskomponenten dieses Gitterpunktes steigen könnte.

Hierbei wird die Trendkomponente mittels der am IGM-C entwickelten Trend-polynomausgleichung (Busch & Linke, 2014) mit einem höchsten Polynomgrad von 6 (Busch, et al., 2018) für jede PSI-Zeit-reihe abgeschätzt. Die dabei ermit-telte Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 der einzelnen Beobachtung re-präsentiert die Standardabweichung eines einzelnen, mit der PSI-Methode ermit-telten Beobachtungswertes, welcher hier als ein Maß für die Beurteilung der sta-tistischen Schwankungen der Messwerte einer Zeit-reihe verwendet wird. Die Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung einer LoS-Bewegung wird in Abbildung 60 dargestellt. Dadurch ist zu erkennen, dass die mittlere Standardab-weichung der von RO-37 ermittelten LoS-Bewegungen deutlich niedriger als die von RO-139 und RO-15 ermittelten ist, während RO-139 auch noch leicht klei-nere Standardabweichungen als RO-15 zeigt. Dies kann den Aufnahmegeome-

trien bzw. der Szenenanzahl des jeweiligen Datenstapels, und den atmosphärischen Einflüsse bzgl. der Aufnahmeurzeiten (bei RO-37 und RO-139 um etwa 5:40, bei RO-15 um etwa 17:20) zugeordnet werden.

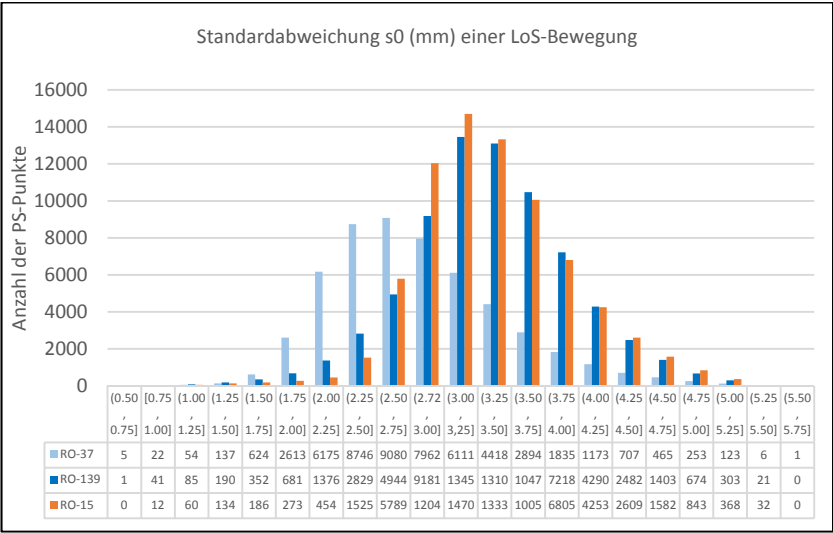


Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung einer LoS-Bewegung der unbeeinigten PSI-Ergebnisse von RO-37, RO-139 und RO-15

Im ersten Schritt wurden alle PS-Punkte mit einer Standardabweichung $\geq 4,44$ mm (1.001 Punkte) aus dem RO-37-Datenstapel entfernt, bei RO-139 dann ab einer Standardabweichung $\geq 4,88$ (580 Punkte) und bei RO-15 über der Standardabweichung $\geq 4,81$ (982 Punkte). Die räumlichen Lagen solcher Punkte zeigt Abbildung 61, wobei die Punkte aus den jeweiligen PSI-Ergebnissen herausgenommen wurden.

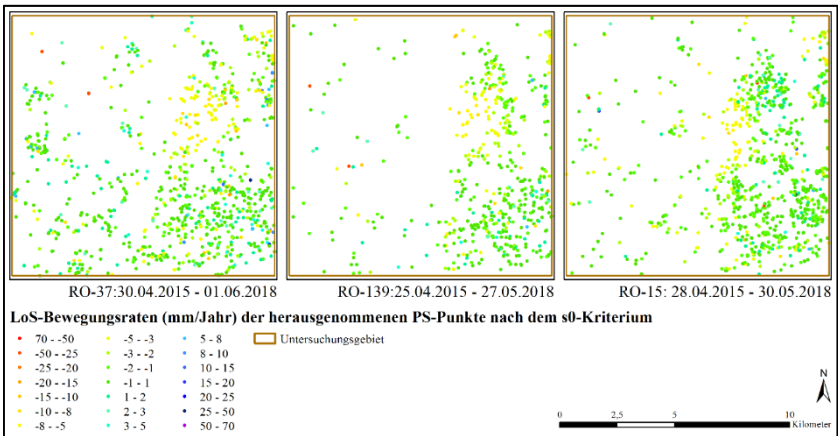


Abbildung 61: LoS-Bewegungsraten der herausgenommenen PS-Punkte von RO-37, RO-139 und RO-15 nach s_0 -Kriterium

Als der zweite Schritt wird die Clusteranalyse über die PSI-Zeitreihen nach Xi (2017) durchgeführt, womit die PS-Punkte mit einem anomalen Bewegungsverhalten bzgl. PS-Punkte in ihrer unmittelbaren Nähe herausgefunden werden. Die Eigenbewegungen solcher PSI-Zeitreihen können sowohl wahre Bewegungen sein, als auch durch zuvor genannten Fehlerquellen hervorgerufen werden. Die prozessfehlerbedingten Anomalien sind grobfehlerhaft und deshalb herauszunehmen. Die lokalen Eigenbewegungen sind, wie bereits erwähnt, für die Erfassung der relativ großflächigen Bodenbewegungen nicht von Interesse, könnten jedoch die Bewegungstendenz der gitterbasierten LoS-Zeitreihen, je nach deren Abstand zu den Gitterpunkten, beeinträchtigen. Noch ungünstiger sind die Rückstreuer, die solche Eigenbewegungen zeigen, allerdings nur von einer der Blickrichtung erfasst werden können, weil bei diesem Fall die lokalen Anomalien sogar die Ergebnisse von kombinatorischen Berechnungen verfälschen könnten. Aus diesen Gründen ist die Detektion von solchen spatio-temporalen Anomalien (Xi, 2017) notwendig.

Beim Einsatz des Verfahrens werden sowohl die aus der PSI-Auswertung herausgegebenen lineare LoS-Bewegungsraten als auch die Reihen der an jedem Aufnahmedatum gemessenen LoS-Bewegung berücksichtigt. Auf der Grundlage des ersten Bereinigungs-schrittes sind die durch diese zwei Parameter ausgedrückten Bewegungsverhalten der verbleibenden PS-Punkte wegen der höheren statistischen Sicherheit besser für die Clusteranalyse geeignet. Zur Beurteilung einer Anomalie werden mindestens 8 räumlich benachbarte PS-Punkte in Betrachtung gezogen.

Durch das Clusterverfahren wurden zusätzlich noch 762 PS-Punkte aus dem RO-15-Ergebnis, 483 PS-Punkte aus dem RO-37-Ergebnis und 596 Punkte aus dem RO-139-Ergebnis als Anomalien herausgenommen. Diese ermittelten Punkte werden in Abbildung 62 dargestellt.

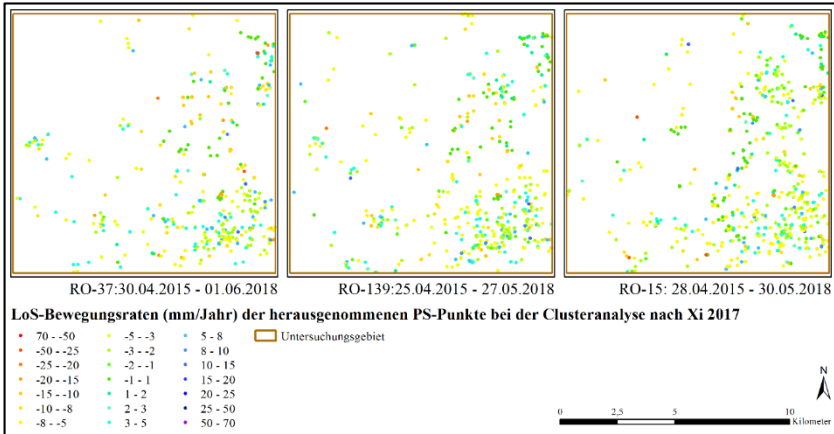


Abbildung 62: LoS-Bewegungsraten der herausgenommenen PS-Punkte von RO-37, RO-139 und RO-15 mittels der Clusteranalyse nach Xi (2017)

Da für das Untersuchungsgebiet davon auszugehen ist, dass keine plötzlichen starken Bewegungen, wie Erdbeben oder Erdfälle, aufgetreten sind, werden abrupte Messwertveränderungen zwischen benachbarten Messzeitpunkten in Form von einer Niveauverschiebung nicht erwartet. Die Zeitreihen, die trotzdem sprunghafte Messwertänderungen zeigen, können daher entweder von den prozessbedingten Phasenabwicklungsfehlern verursacht werden, oder durch Rauschen an einzelnen Messwerten entstehen. Für die Analyse der bodenbewegungsbedingten LoS-Messung sind solche Zeitreihen nicht repräsentativ und grobfehlerhaft. Als letzter Schritt werden die verbleibenden PSI-Zeitreihen, in denen solche abrupten Messwertänderungen vorkommen, detektiert.

Mittels der sensorfrequenzbedingten, maximal erfassbaren Bewegungen (vgl. Kapitel 3.2.3) zwischen zwei Messzeitpunkten sollten nach Yin et al. (2015) sprunghafte Zeitreihen bzgl. des Phasenabwicklungsfehlers herausgefunden werden. Dieses Verfahren ist jedoch bei starken Messwertschwankungen der PSI-Zeitreihen, z. B. hier etwa 2,5 mm bis 3,5 mm, nicht robust. Hierbei wird die Detektionsmethode auf der Grundlage von Yin et al. (2015) um eine Signifikanzprüfung erweitert. Für die nach Yin et al. (2015) detektierten sprunghaften Zeitpunkte der PSI-Zeitreihen (Kandidatenzeitpunkt) wird eine lineare Regressionsanalyse für die Zeitabschnitte erfahrungsgemäß mit 7 Messzeitpunkten vor und nach diesen Zeitpunkten durchgeführt. Die Standardabweichungen der zwei

Zeitabschnitte einer Zeitreihe werden bzgl. der jeweiligen Regressionsgeraden berechnet. Schematisch stellt Abbildung 63 die Situation dar. Anhand der zwei Regressionsgeraden mit dem jeweiligen Schwankungsbereich (hellgrüne und hellblaue Fläche in Abbildung 63) werden deren Überlappung und deren Gesamtausstreckung berechnet. Ein Kandidatenzeitpunkt wird als signifikant gekennzeichnet, wenn die Überlappung nicht größer als 30 % der Gesamtausstreckung ist, und die linearen Trends von den Zeitabschnitten vor und nach ihm gleiches Vorzeichen besitzen.

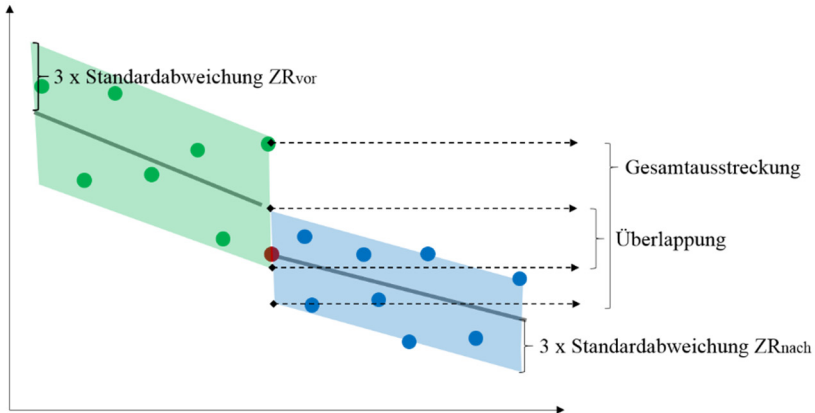


Abbildung 63: Schematische Darstellung der Signifikanzprüfung eines Kandidatenzeitpunktes (roter Punkt) mittels einer linearen Regression für die Zeitabschnitte mit 7 Aufnahmen vor (grüne Punkte) und nach (blaue Punkte) dem Kandidatenzeitpunkt

Auf Basis der beschriebenen Signifikanzprüfung werden aus dem RO-37-Ergebnis 472 PS-Punkte, dem RO-139-Ergebnis 1.716 PS-Punkte und dem RO-15-Ergebnis 3.104 PS-Punkte herausgenommen, bei denen mindestens eine signifikante Messwertveränderung detektiert wurde. Da solche abrupten Messwertveränderungen auch von anderen Gründen außer schnellen Bewegung hervorgerufen werden können, z. B. von starken atmosphärischen Einflüssen oder Rauchen, können sich die betroffenen PS-Punkte auch in bewegungsfreien Gebiet befinden. Abbildung 64 stellt die herausgenommenen Punkte dar.

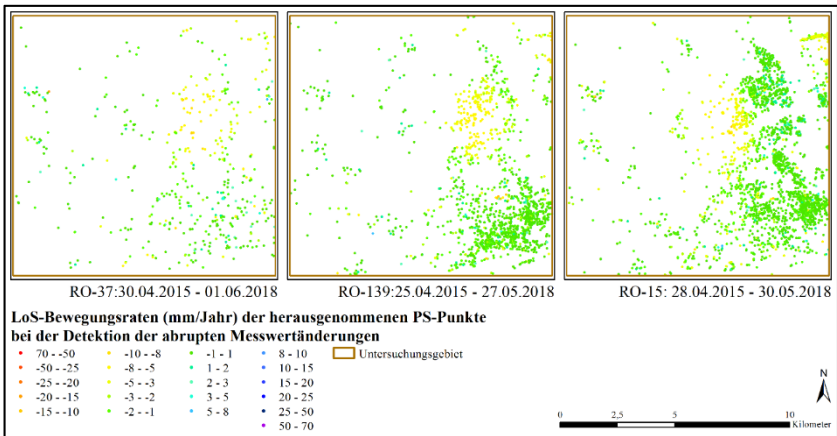


Abbildung 64: LoS-Bewegungsraten der herausgenommenen PS-Punkte bei der Detektion der abrupten Messwertveränderungen

Insgesamt sind durch die drei Schritte der Datenbereinigung ca. 3,7 % der PS-Punkte des RO-37-Ergebnisse, ca. 4,0 % der PS-Punkte des RO-139-Ergebnisses und ca. 6,5 % der RO-15 PS-Punkte aus den Eingangsdaten für die kombinativen Berechnungen herausgenommen worden. In

Tabelle 7 werden die Veränderungen an der Punktzahl in den jeweiligen PSI-Ergebnissen vor und nach der Datenbereinigung nochmal zusammengefasst. Die bereinigten PSI-Ergebnisse werden in Abbildung 65 dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnis der Datenbereinigung

| | RO-37 | RO-139 | RO-15 |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Anzahl der PS-Punkte vor der Datenbereinigung | 53.405 | 73.100 | 75.064 |
| Anzahl der eliminierten PS-Punkte | 1.956 | 2.892 | 4.848 |
| Anzahl der PS-Punkte nach der Datenbereinigung | 51.449 | 70.208 | 70.216 |

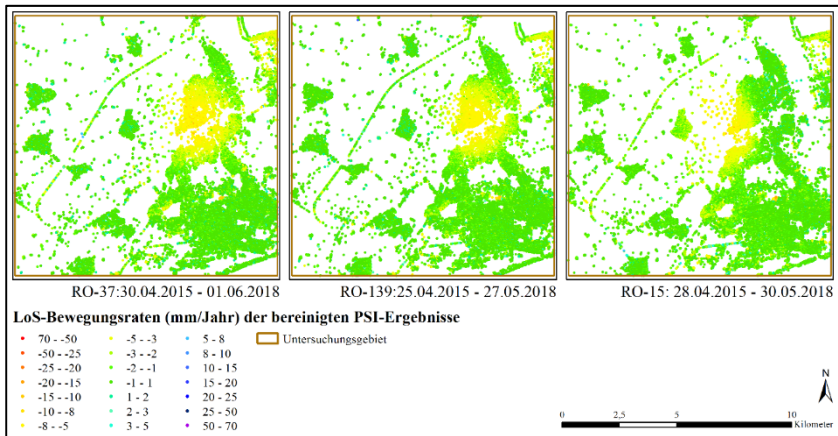


Abbildung 65: LoS-Bewegungsraten (mm/Jahr) der bereinigten PSI-Ergebnisse von den RO-15-, RO-139- und RO-37-Datenstapeln

Neben der Anzahl von PS-Punkte ist die räumliche Verteilung von PS-Punkte auch ein maßgebendes Attribut der PSI-Ergebnisse. Die bereinigten PSI-Ergebnissen, sowie die ursprünglichen PSI-Ergebnisse, zeigen eine relativ inhomogene Punktverteilung. Die Begründung für dieses Erscheinungsbild besteht darin, dass die Rückstreuer mit langzeitstabilen Rückstreuungseigenschaften und starker Rückstreuintensität meistens von anthropogen gebildeten Strukturen geliefert werden. Durch die flächenhaften Darstellungen von LoS-Bewegungen der drei PSI-Ergebnisse ist es zu erkennen, dass das Bewegungsgebiet sowohl städtische Bereiche im Osten als auch ländliche Bereiche im Westen berührt.

Die PS-Punkte im PSI-Ergebnis vom RO-37 besitzen einen durchschnittlichen Punktabstand, welcher dem Mittelwert von Distanzen zwischen jedem Punkt und seinem nächsten Nachbarpunkt entspricht (ESRI, 2018), von ca. 7,6 m. Dieser Abstand beträgt bei RO-15 ca. 5,8 m und bei RO-139 dann 5,9 m.

5.3 Ergebnisse der kombinativen Berechnungen

Anhand der bereinigten PSI-Ergebnisse kann die kombinatorische Berechnung mit sich kreuzenden Tracks unter der Verwendung von zwei verschiedenen Konstellationen durchgeführt werden, während die kombinatorische Berechnung mit parallelen Tracks unter der Nutzung von den zwei verfügbaren Descending-PSI-Ergebnissen implementiert werden kann.

Über das Untersuchungsgebiet wird für die Vergleichbarkeit der drei kombinatorischen Berechnungen ein Gitterpunktnetz erstellt. Zur Definition eines Gitternetzes

gehören mindestens zwei Aspekte: Orientierung und Gitterpunktabstände. Aufgrund der Zusammenverwendung von sich kreuzenden Tracks ist die Orientierung anhand einer Achse in Nordrichtung definiert, während die andere dazu orthogonal stehende Achse nach Osten zeigt, anstatt der Blickrichtung einer der Aufnahmegeometrien zu folgen. Die Gitterpunktabstände in Nord-Süd- und Ost-West-Richtungen werden identisch gehalten. Hierbei werden die Gitterabstände von 20 m ($S = 20\text{ m}$) in beiden Richtungen verwendet. Dies entspricht ESA's Angaben über die durchschnittliche Auflösung⁷ in der Azimut-Richtung von Sentinel-1 (Bourbigot, et al., 2016).

Für die IDW-Interpolation der LoS-Bewegungen jedes Datums muss ein Suchradius festgelegt werden. Hierbei wird der Suchradius relativ klein gehalten, um die Einflüsse der relativ weit entfernten PS-Punkte auf dem zu interpolierenden Gitterpunkt zu reduzieren. Auf der anderen Seite müssen für die Interpolation an Gitterpunkten genügend PS-Punkte zur Verfügung stehen. Neben den durchschnittlichen Abständen von den PS-Punkten zu deren jeweiligen nächsten Nachbarn wird hierbei zusätzlich der durchschnittliche Radius des Umkreises an allen PS-Punkten berechnet, innerhalb dessen ein PS-Punkt mindestens 8 nächst benachbarte PS-Punkte finden kann. In Tabelle 8 wird die Übersicht der zwei oben genannten Analysen dargestellt.

Tabelle 8: Durchschnittliche Abstände der PS-Punkte zu deren nächsten Nachbarpunkt und statistische Übersicht der Radien, womit ein PS-Punkt mindestens 8 nächst benachbarte PS-Punkte finden kann, für die drei bereinigten PSI-Ergebnisse

| | Durchschnittlicher Radius (m) | Kleinster Radius (m) | Größter Radius (m) |
|--------|-------------------------------|----------------------|--------------------|
| RO-37 | 38,5 | 3,4 | 884,8 |
| RO-139 | 31,7 | 3,4 | 761,9 |
| RO-15 | 31,5 | 4,0 | 715,9 |

Aus den Analysen der räumlichen Punktverteilung der drei PSI-Ergebnisse ist somit weiterhin zu erkennen, dass die PS-Punkte aus dem RO-37-PSI-Ergebnis weniger dicht als die aus den anderen zwei PSI-Ergebnissen zusammenliegen. Als Mittelwert können die PS-Punkte in einer Distanz von ca. 6 bis 8 m zu ihren nächstliegenden Nachbarpunkten erwartet werden. Eine ausreichende Distanz für mehrere benachbarte Punkte kann jedoch der durchschnittliche Radius des Umkreises mit mindestens 8 Nachbarn indizieren. Der Suchradius für die Inter-

⁷ Tabelle „Resolution and Swath“ nach Angaben von ESA: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload/resolution-swath> (letzter Zugriff am 11.09.2019)

polation aller PSI-Ergebnisse ist daher durch den größten durchschnittlichen Radius, also dem durchschnittlichen Radius vom RO-37, festgelegt, und auf 40 m aufgerundet.

5.3.1 Kombinatativ berechnete Höhenänderungen

Mittels des in Kapitel 5.2 erläuterten Ablaufs werden die gitterbasierten Höhenänderungszeitreihen für alle drei Kombinationen berechnet, während die Ost-West-Bewegungskomponente nur für die zwei Kombinationen mit sich kreuzenden Tracks ermittelt wird. Für die Gitterpunkte, welche mindestens jeweils einen PS-Punkt aus den beiden eingegebenen PSI-Ergebnissen in deren Umkreisen mit einem Radius von 40 m besitzen, werden die kombinativen Berechnungen durchgeführt. Die von den drei Kombinationen ermittelten Gesamthöhenänderungen über dem Zeitraum von April 2015 bis Mai 2018 werden in Abbildung 66 dargestellt. Diese Gesamthöhenänderungen wurden aus den mittels der Trendpolynomausgleichung ermittelten Funktionswerten berechnet, wodurch die Ergebnisse der kombinativen Berechnungen von dem noch vorhandenen Rauschen befreit sein sollten. Der maximal zugelassene Polynomgrad liegt bei 6 (Busch & Linke, 2014).

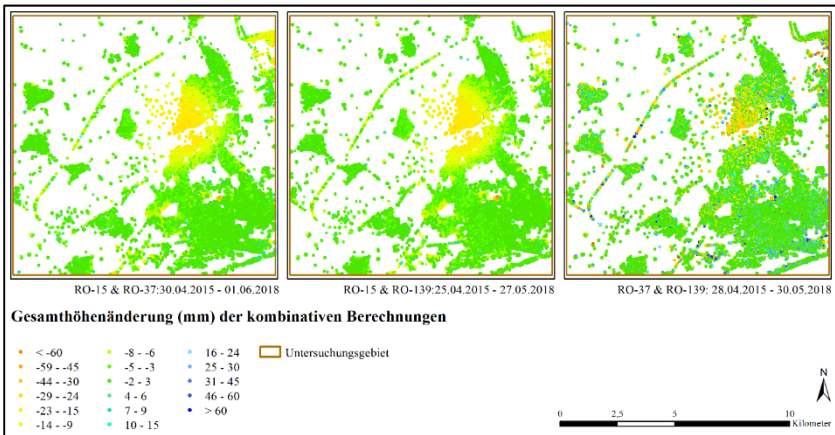
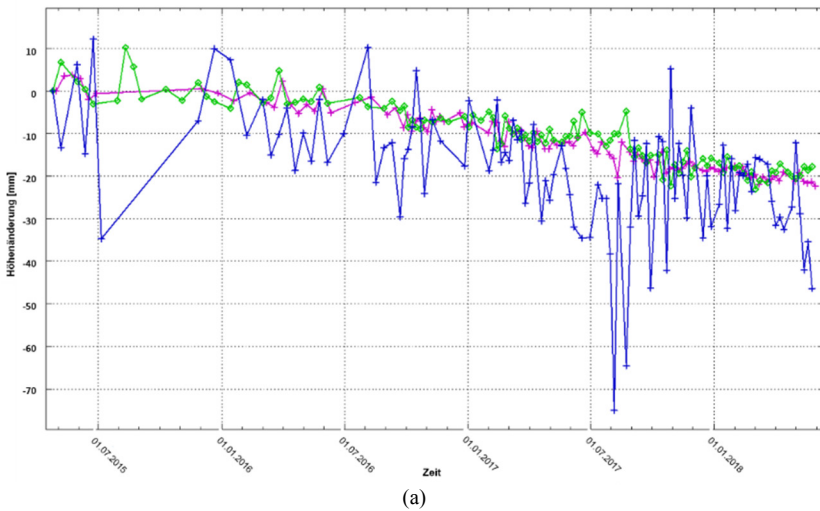
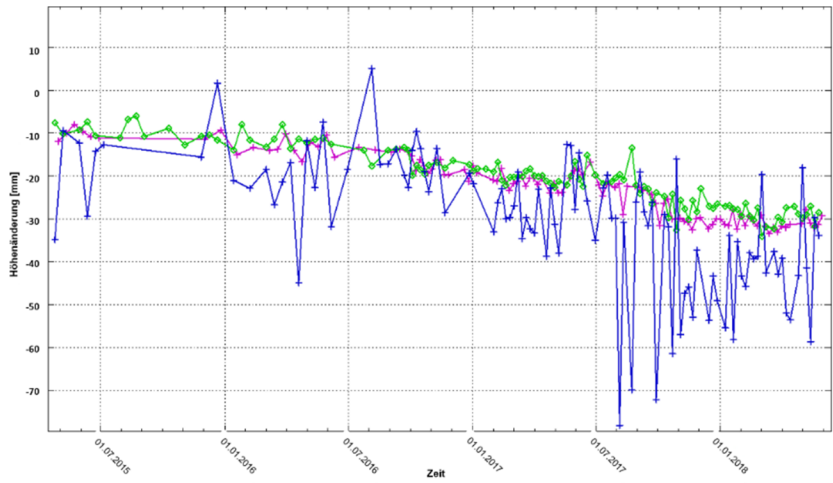


Abbildung 66: Mittels der Trendpolynomfunktion abgeleitete Gesamthöhenänderung im Zeitraum 04/2015 – 05/2018 aus den kombinativen Berechnungen

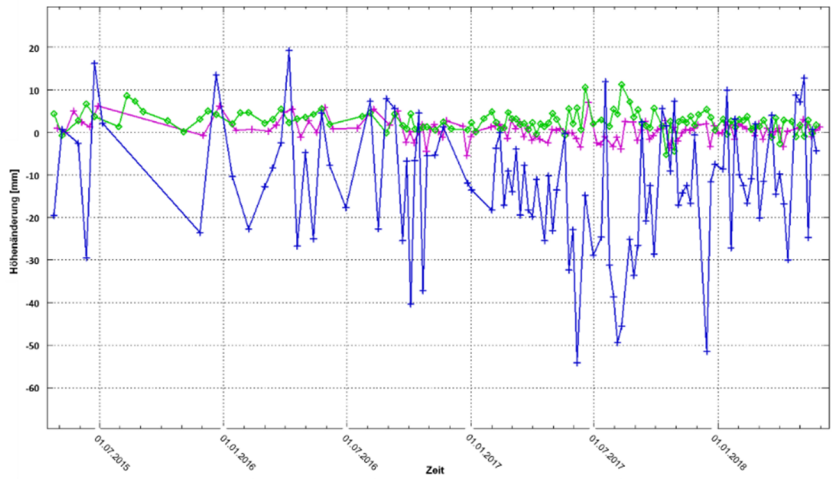
Das linke und mittlere Bild in Abbildung 66 stellen die Gesamthöhenänderungen der kombinativen Berechnungen mit sich kreuzenden Tracks dar. Die Senkungsmulde wurde von den beiden Kombinationen identisch ermittelt, indem die Senkungsmulden im linken und mittleren Bild etwa den gleichen Umfang (z. B. Umfang der gelben Fläche) mit gleicher Größenordnung aufweisen.

Im Gegensatz dazu ist die mit parallelen Tracks ermittelte Höhenänderung trotz der Trendpolynomausgleichung viel verrauschter als die andere zwei Ergebnisse. Die gelben und grünen Gitterpunkte sind räumlich stark vermischt, wobei nur in der Senkungsmittle die Überzahl von gelben Gitterpunkten zu erkennen ist. Somit kann keine signifikante Abgrenzung des Senkungsgebiets dargestellt werden. Darüber hinaus sind noch blaue bis dunkelblaue Gitterpunkte als Einzelpunkt im gesamten Ergebnis aus den parallelen Tracks zu identifizieren, welche eine große Abweichung zu deren Nachbargitterpunkten zeigen. Um die Höhenänderungsverläufe der drei Ergebnisse direkt zu vergleichen, werden Zeitreihen aus drei Ergebnissen an beispielhaften Gitterpunkten im Senkungsgebiet (Abbildung 67a - b) und bewegungsfreien Gebiet (Abbildung 67c - d) gegenübergestellt.

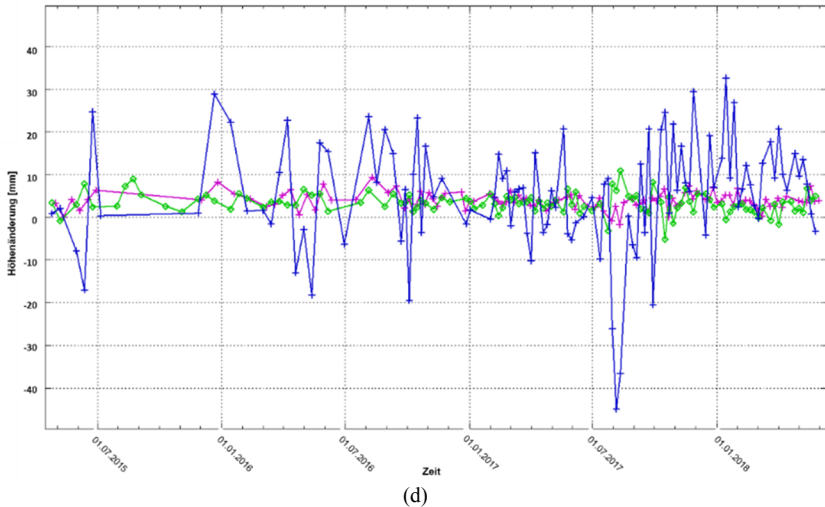




(b)



(c)



(d)
Abbildung 67 Beispielhafte Zeitreihen der kombinativen berechneten Höhenänderungen aus den zwei Verfahren (drei Konstellationskombinationen)

Die Höhenänderungszeitreihen aus der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks (grüne und lila Kurven) zeigen sowohl im Senkungsgebiet als auch im bewegungsfreien Gebiet übereinstimmende Verläufe. Die Differenzen zwischen diesen zwei Ergebnissen sind an einzelnen Messzeitpunkten meistens nicht größer als 8 mm, während sich deren Trends nur geringfügig voneinander unterscheiden. Im Gegensatz dazu zeigen die Zeitreihen aus der kombinativen Berechnung mit parallelen Tracks (blaue Zeitreihen) mit starken Messwert-schwankungen, wodurch die Bewegungstendenzen von solchen Zeitreihen nicht eindeutig erkennbar sind, bzw. mit relativ großen Unsicherheiten versehen werden müssen. Dies entspricht der theoretischen Ableitung der statistischen Unsicherheit in Kapitel 4.4.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Polynomausgleichungen kann auch ein erster Vergleich der ermittelten Höhenänderungsverläufe der drei kombinativen Berechnungen erfolgen. In Abbildung 68 werden die räumlichen Verteilungen der Polynomgrade der durch die Trendpolynomausgleichung ermittelten Funktionen dargestellt. Die mit grüner Farbe dargestellten Gitterpunkte wurden mit einem Polynom 0. Grades geschätzt, welche die Bereiche ohne Höhenänderungen indizieren sollten. Durch die anderen Farben werden die Bewegungsverhalten mit Polynomen 1. bis 6. Grades dargestellt, was jeweils einem Bewegungsvorgang ohne Berücksichtigung seiner Größenordnung entspricht.

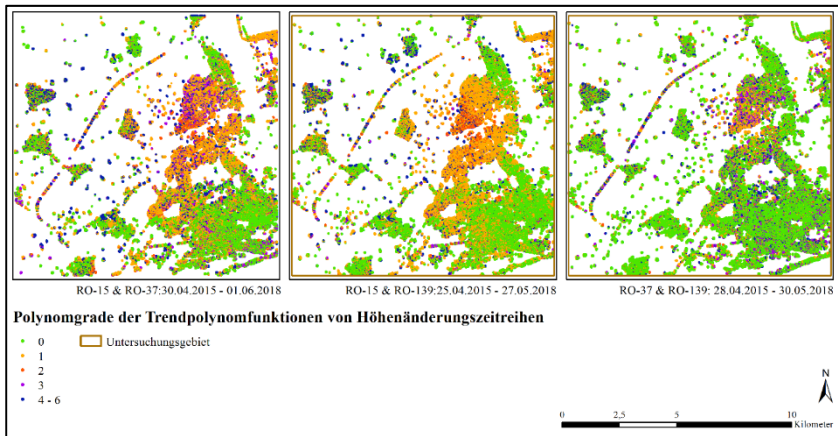


Abbildung 68: Räumliche Darstellung der Verteilung der Polynomgrade der Trendpolynomfunktionen für die Höhenänderungen

Die ermittelten Polynomgrade (Tabelle 9) geben einen Überblick zum Höhenänderungsverhalten im Untersuchungsgebiet innerhalb der Zeiträume 04/2015 – 04/2018.

Tabelle 9: Ermittelte Polynomgrade der gitterbasierten Höhenänderungszeitreihen

| POLYNOMGRAD | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|-------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| RO-15 & RO-37 | Anzahl der Gitterpunkte | 27.352 | 26.725 | 4.779 | 6.528 | 3.954 | 1.656 | 2.217 |
| | Prozentuale Anzahl (%) | 37,3 | 36,5 | 6,5 | 8,9 | 5,4 | 2,3 | 3,0 |
| RO-15 & RO-139 | Anzahl der Gitterpunkte | 33.689 | 30.996 | 4.159 | 1.302 | 2.633 | 1.891 | 1.894 |
| | Prozentuale Anzahl (%) | 44,0 | 40,5 | 5,4 | 1,7 | 3,4 | 2,5 | 2,5 |
| RO-37 & RO-139 | Anzahl der Gitterpunkte | 51.240 | 10.544 | 2.711 | 6.921 | 2.424 | 1.419 | 2.712 |
| | Prozentuale Anzahl (%) | 65,7 | 13,5 | 3,5 | 8,9 | 3,1 | 1,8 | 3,5 |

In den beiden Ergebnissen der kombinatorischen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks wurden die meisten Höhenänderungszeitreihen (jeweils über 70 % - 80 %) mit einem Polynomgrad von 0 und 1 abgeschätzt, wobei die Anzahl von den Zeitreihen mit dem Polynom 0. Grades nur jeweils geringfügig höher als die mit dem Polynom 1. Grades ist. Die Zeitreihen mit einem Polynom 1. Grades entsprechen den in Abbildung 68 mit oranger Farbe dargestellten Gitterpunkten,

welche im Senkungsgebiet verteilt sind. Dies indiziert eine konstante Höhenänderungsgeschwindigkeit (hier Senkung). Zudem sind rotfarbige Gitterpunkte in der Mitte des Senkungsgebietes in den beiden Ergebnissen der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks zu erkennen, welche dem Polynom 2. Grades entsprechen.

Dies weist auf eine Geschwindigkeitszunahme oder -abnahme der Höhenänderungszeitreihen (Yin, et al., 2018) hin. Für dieses Untersuchungsgebiet entsprechen sie einem leichtzunehmenden Senkungsverlauf. Dies trifft für ca. 5 % - 6 % aller Gitterpunkte der mittels sich kreuzender Tracks kombinativ berechneten Höhenänderungszeitreihen zu (Tabelle 9). Bei den mittels paralleler Tracks ermittelten, gitterbasierten Höhenänderungszeitreihen liegt die Mehrheit eindeutig beim Polynom 0. Grades, während nur wenig (13,5 %) Gitterpunkte in der Senkungsmittle ein lineares Höhenänderungsverhalten aufweisen. Die Zeitreihen mit einem Polynomgrad von über 3 treten bei allen drei Ergebnissen ähnlich häufig auf.

Hierbei ist es zu beachten, dass die Interpretation über Polynomgrade unabhängig von der Größenordnung der Bewegungen in jeweiligen Zeitraum ist, d. h. ein linearer Senkungsverlauf kann auch lediglich eine kleine Geschwindigkeit von unter 1 mm pro Jahr aufweisen. Auf der anderen Seite hängt die Aussagekraft des Polynomgrades von der Schwankung der Messwerte bzgl. der angepassten Polynomfunktion ab. Die weiteren Untersuchungen in Kapitel 6.1 sollen eine Übersicht zur statistischen Qualität der gitterbasierten Bewegungskomponenten geben.

5.3.2 Kombinativ berechnete Ost-West-Bewegungskomponente

Die Ost-West-Bewegungskomponente wurde bei der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks auch in Form von Zeitreihen berechnet und mit dem orthogonalen Polynom angepasst. Die aus den Funktionswerten des Trendpolynoms ermittelte Gesamthorizontalebewegung in Ost-West-Richtung ist in Abbildung 69 dargestellt.

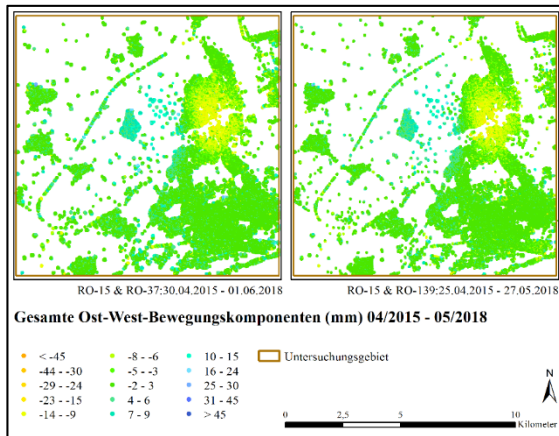
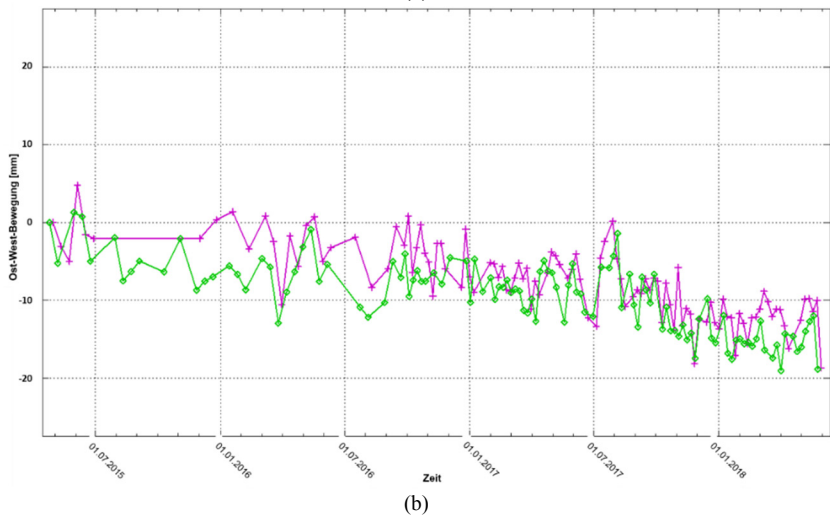
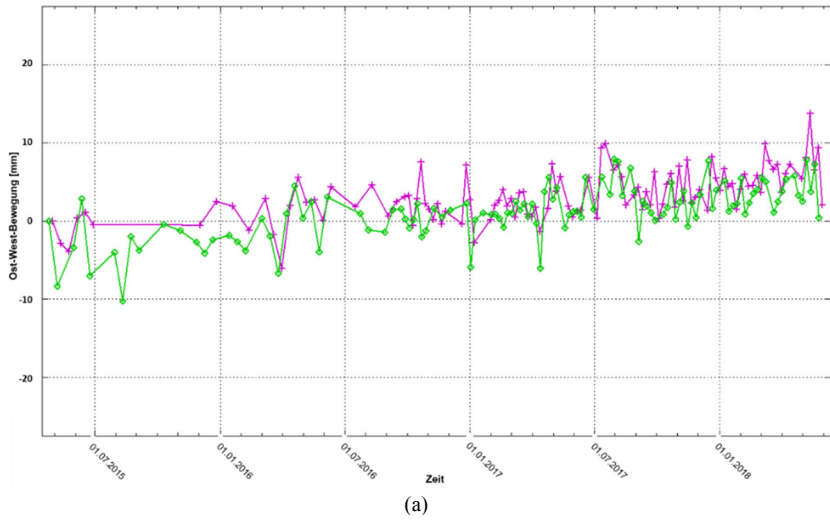
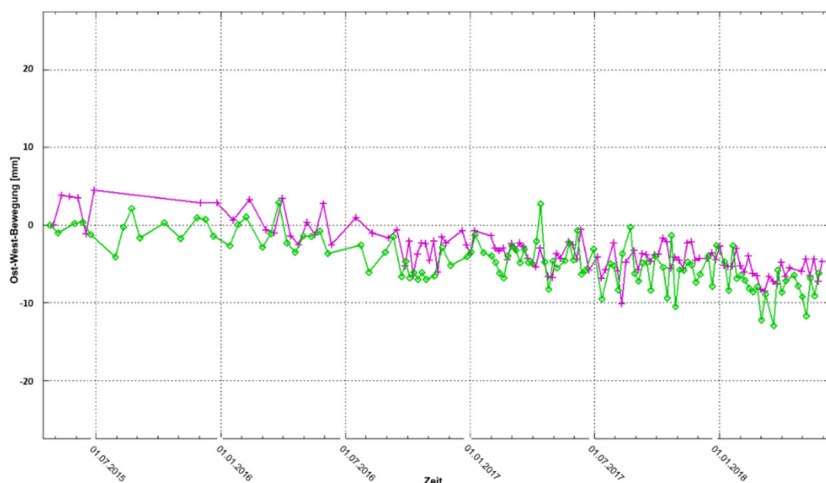


Abbildung 69: Mittels der Trendpolynomfunktion abgeleitete Ost-West-Bewegungskomponenten im Zeitraum 04/2015 – 05/2018 aus den kombinativen Berechnungen

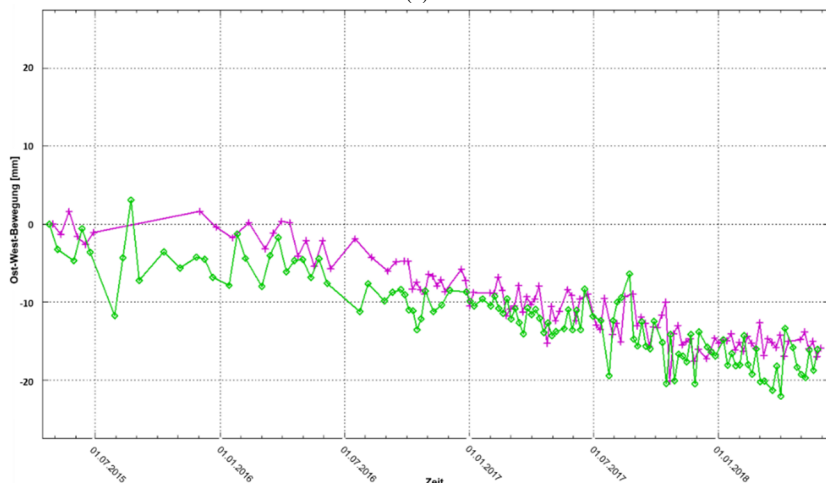
Die blaue Farbe in Abbildung 69 deutet auf ein positives Vorzeichen der Ost-West-Bewegungskomponente hin, d. h. eine Horizontalbewegung nach Osten, wobei eine gelbe bis rote Farbe eine Horizontalbewegung nach Westen darstellt. Somit kann in Abbildung 69 erkannt werden, dass die linke Seite der Senkungsmulden bei beiden Ergebnissen eine bläuliche Farbe zeigen, dementsprechend eine positive Ost-West-Bewegungskomponente nach Osten erfolgt. Auf der gegenüberstehenden Seite der Senkungsmulde befinden sich die Gitterpunkte mit gelber Farbe, die auf eine negative Ost-West-Bewegungskomponente nach Westen hindeuten. In der Mitte der Senkungsmulde zeigen die beiden Ergebnisse eine grüne Farbe, wodurch keine bis nur sehr kleine (<1 mm pro Jahr) Ost-West-Bewegungskomponente indiziert wurde. Somit entspricht die ermittelten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponente der generellen Modellvorstellung einer Senkungsmulde, wobei die Ost-West-Bewegungskomponente in die Mitte der Senkungsmulde zeigt, während sie in der Senkungsmulde nicht auftritt (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 27).

Abbildung 70a – b stellt beispielhaft die Zeitreihen der Ost-West-Bewegungskomponente aus den beiden Ergebnissen dar. Die ausgewählten Gitterpunkte befinden sich auf der Hauptachse in der Ost-West-Richtung, worauf die Ost-West-Bewegungskomponente der Horizontalbewegung groß bis maximal sein sollte. Abbildung 70c – d zeigt dann dementsprechend die Höhenänderungsverläufe an denselben Gitterpunkten.





(c)



(d)

Abbildung 70: Beispielhafte Zeitreihen der kombinativ berechneten Ost-West-Bewegungskomponente (a und b) und die entsprechenden Höhenänderungen (c und d)

Die Zeitreihen der Ost-West-Bewegungskomponente aus der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks (grüne mit RO-139 und lila mit RO-37) zeigen gleichfalls einen übereinstimmenden Verlauf. Die Ost-West-Bewegungskomponente an den beiden Beispielgitterpunkten entspricht betragsmäßig der jeweiligen Höhenänderung und zeigen ähnliche Kurventendenzen wie die Höhenänderungszeitreihen. Darüber hinaus zeigen die Messwerte der Ost-West-Bewegungskomponente (Abbildung 70a – b) leicht verstärkte Schwankung im

Vergleich zu den jeweiligen Höhenänderungszeitreihen. Dies widerspiegelt die theoretisch abgeleitete Relation zwischen der kombinativ berechneten Höhenänderung und Ost-West-Bewegung (Kapitel 4.3.3).

In Abbildung 71 werden die räumlichen Verteilungen der Polynomgrade der Zeitreihen von der Ost-West-Bewegungskomponente dargestellt. Dazu gibt die darauffolgende Tabelle den Überblick über dieses Bewegungsverhalten im Untersuchungsgebiet innerhalb der Zeiträume 04/2015 – 04/2018.

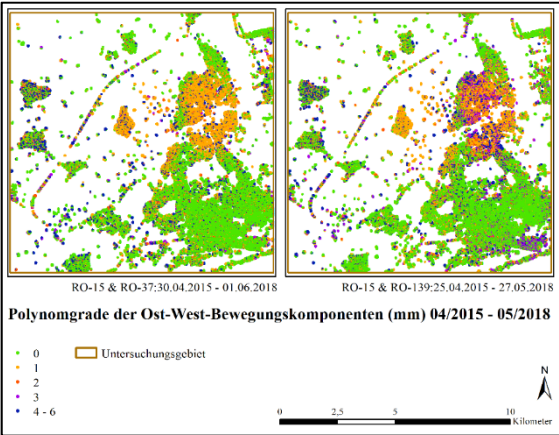


Abbildung 71: Räumliche Darstellung der Verteilung der Polynomgrade der Trendpolynomfunktionen für die Ost-West-Bewegungskomponenten

Tabelle 10: Ermittelte Polynomgrade der gitterbasierten Ost-West-Bewegungskomponente

| POLYNOMGRAD | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|-------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| RO-15 & RO-37 | Anzahl der Gitterpunkte | 42.398 | 19.273 | 2.929 | 1.395 | 3.650 | 1.494 | 2.072 |
| | Prozentuale Anzahl (%) | 57,9 | 26,3 | 4,0 | 1,9 | 5,0 | 2,0 | 2,8 |
| RO-15 & RO-139 | Anzahl der Gitterpunkte | 42.396 | 16.854 | 3.690 | 6.468 | 2.362 | 1.130 | 3.664 |
| | Prozentuale Anzahl (%) | 55,4 | 22,0 | 4,8 | 8,4 | 3,1 | 1,5 | 4,8 |

Die Häufigkeitsverteilung der sieben Polynomgrade ist bei den beiden Ergebnissen ähnlich. Hierbei wurden eindeutig mehr Zeitreihen der Ost-West-Bewegungskomponente mit einem Polynomgrad von 0 angepasst (jeweils über 50 %), während die Anzahl von den Zeitreihen mit dem Polynom 1. Grades (je-

weils über 20%) zwar deutlich weniger als die Anzahl vom Polynomgrad 0, jedoch mehr als die von den höheren Polynomgraden aufweisen. Zudem zeigt das Ergebnis aus der Kombination RO-15 und RO-139 in Abbildung 71 einen erhöhten Anteil am Polynomgrad 3. Dies kann auch am leicht höheren Messrauschen des Ergebnisses liegen. Im Vergleich zur Höhenänderung weisen mehr Gitterpunkte keine Ost-West-Bewegungskomponente auf, wobei es noch zu beachten ist, dass diese Aussage nur die Horizontalbewegung in der Ost-West-Richtung betrifft und nicht auf Abwesenheit von Horizontalbewegungen in Nord-Süd-Richtung hindeutet.

5.4 Raumzeitliche Analysen der kombinativ berechneten Bewegungskomponenten

Die bisher dargestellten Ergebnisse der kombinativen Berechnungen sind jeweils lediglich die gesamte Höhenänderung und Ost-West-Bewegungskomponente über dem ganzen Untersuchungszeitraum, welche durch die Differenzbildung des ersten und letzten Funktionswertes jeder gitterbasierten Zeitreihen berechnet wurden. Die Bodenbewegung bzw. Bodenbewegungskomponenten sind jedoch sich räumliche und zeitlich veränderte Größen. In diesem Kapitel wird die Entwicklung der zwei ermittelten Bodenbewegungskomponenten im Raum und über die Zeit untersucht, welche als Grundlagen für die Abschätzung der systematischen Abweichungen in Kapitel 6 dienen.

5.4.1 *Jahresscheiben der Höhenänderung und Ost-West-Bewegungskomponente*

Zur Berechnung der Höhenänderungsdifferenzen für einen bestimmten Zeitraum können die Funktionswerte der Trendfunktionen für die gitterbasierten Zeitreihen benutzt werden. Einer der aus der Trendpolynomausgleichung ermittelten statistischen Merkmale, die Standardabweichung ausgeglichener Beobachtungen (Funktionswerte), kann für die Berechnung der Standardabweichung einer Höhenänderungsdifferenz mit dem Varianzfortpflanzungsgesetz eingesetzt werden (Busch, et al., 2018). Dies wird bei der Signifikanzermittlung einer kombinativ berechneten Bewegungskomponente in bestimmten Zeiträumen berücksichtigt. Hierzu werden die Ergebnisse der statistischen Unsicherheiten der kombinativ berechneten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponenten der verschiedenen Kombinationen in Kapitel 6.1 vorgegriffen. Ausgegangen von einer gleichen Unsicherheit jeder ausgeglichenen Beobachtung können die durchschnittliche Standardabweichung der gesamten Höhenänderung bzw. Ost-

West-Bewegungskomponente für die aus Funktionswerten berechneten Höhenänderung und Ost-West-Bewegungskomponenten innerhalb eines beliebigen Zeitraums übertragen werden. Die durchschnittlichen signifikanten Höhenänderungs- und Ost-West-Bewegungsdifferenzen liegen jeweils bei ca. 2,0 mm und 2,1 mm. Hierbei wird für die beiden Bodenbewegungskomponenten einheitlich 2 mm als die durchschnittliche Signifikanzgrenze angenommen. Dementsprechend werden alle Höhenänderungs- und Ost-West-Bewegungsdifferenzen von -2 mm bis 2 mm als nicht signifikant betrachtet.

Aus den Funktionswerten werden die gitterbasierten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponente für jedes Jahr berechnet, wodurch die Entwicklungen der Bewegungsgeschwindigkeiten aus verschiedenen Kombinationen flächenhaft ersichtlich sind und miteinander verglichen werden können. Diese Jahresscheiben für die Höhenänderungen werden in Abbildung 72 mit einer einheitlichen Farbskala dargestellt. Die jährlichen Höhenänderungsdifferenzen, deren Beträge kleiner als 2 mm sind, werden mit grüner Farbe dargestellt. In Abbildung 73 werden die ebenfalls berechneten Jahresscheiben der Ost-West-Bewegungskomponenten dargestellt. Hierbei werden nur die Gitterpunkte dargestellt, die eine signifikante funktionswertbezogene Gesamthöhenänderung im Hinblick auf ihrer Standardabweichung, bzw. eine signifikante gesamte Ost-West-Bewegungskomponente zeigen. Bei Festlegung einer Signifikanzschwelle von 99 % kann der Betrag des Quotienten größer 2,57 angenommen werden, damit die Höhenänderungs- und Ost-West-Bewegungsdifferenzen als signifikant bezeichnet werden können (Siehe Kapitel 6.1).

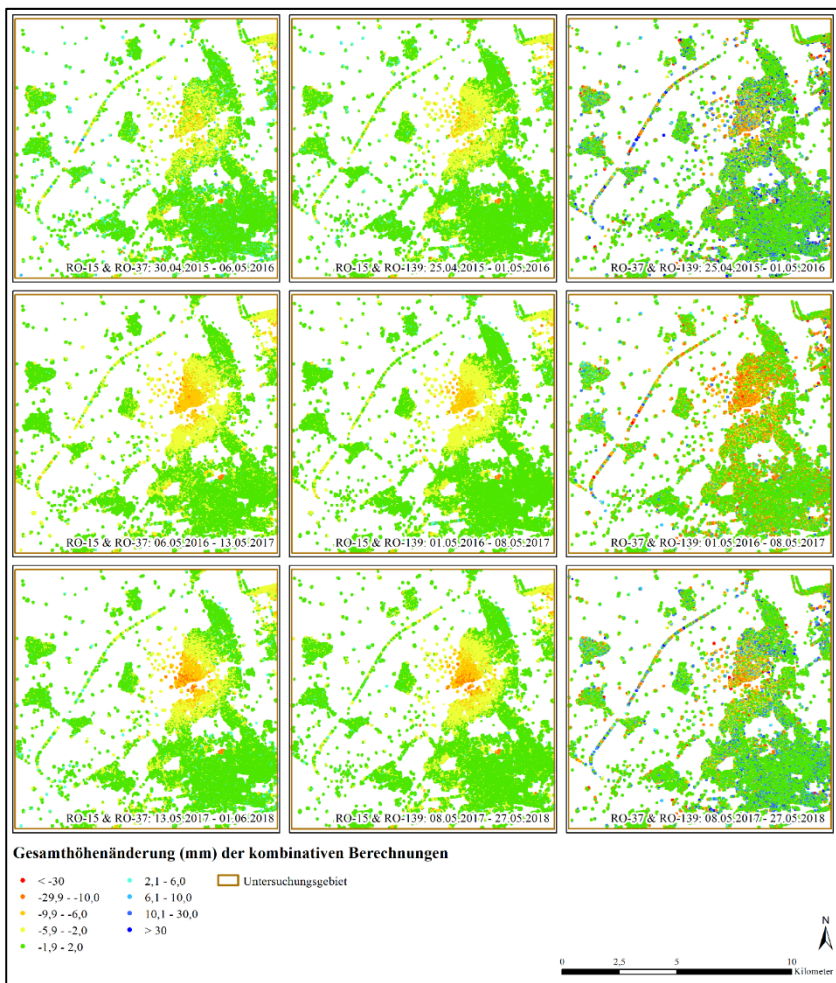


Abbildung 72: Jahresscheiben der Gesamthöhenänderung der jeweiligen kombinatorischen Berechnung

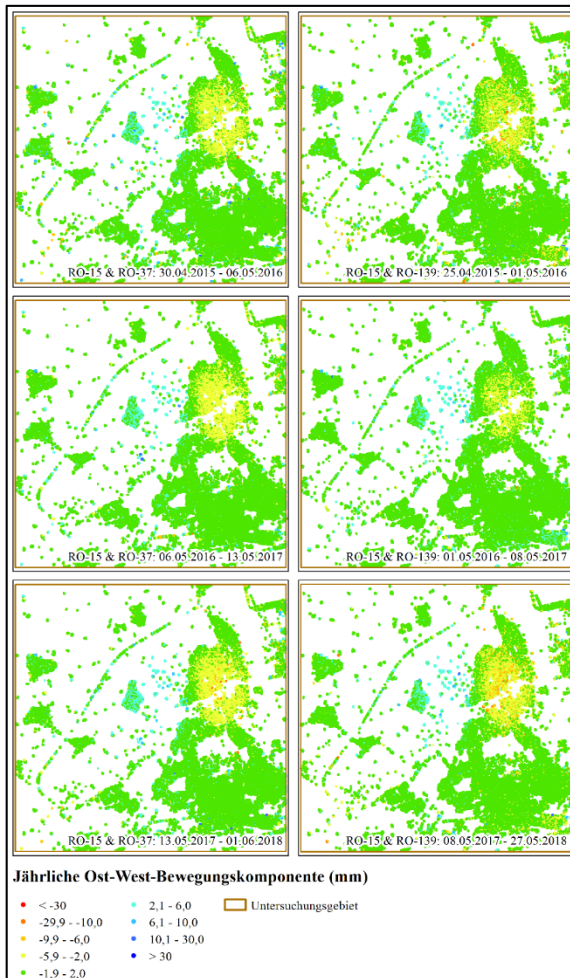


Abbildung 73: Jahresscheiben der gesamten Ost-West-Bewegungskomponente der jeweiligen kombinativen Berechnung

Zusammendargestellt werden auch die Jahresscheiben der mittels parallelen Tracks kombinativ berechneten Höhenänderungen. Hierbei zeigt die jährliche Entwicklung dieser Höhenänderung auch ein sehr starkes Rauschen durch die Vermischung der verschiedenen Höhenänderungsbeträge in kleinen räumlichen Bereichen. Man kann nur eine Zunahme der Höhenänderungen vom ersten Jahr zum zweiten Jahr durch die Zunahme der orange farbigen Gitterpunkte erkennen, wobei die große Anzahl der grünen und sogar blauen Gitterpunkte die Zufälligkeit dieser Ergebnisse zeigt. Die weiteren Untersuchungen werden aufgrund der

großen Messunsicherheit deshalb nicht mehr auf die somit ermittelten Höhenänderungen durchgeführt.

Die beiden mit sich kreuzenden Tracks kombinatorisch berechneten Höhenänderungen in Abbildung 72 zeigen eine gleiche Entwicklungstendenz, in welcher die Höhenänderungen von Jahr zu Jahr zunehmen. Dabei ist auffällig, dass die Höhenänderung im Zeitraum 04/2015 – 05/2016 mittels der Kombination „RO-15 und RO-37“ kleiner ist, sowohl im Sinne der räumlichen Ausdehnung der Senkungen, als auch im Hinblick auf die größere Anzahl der Gitterpunkte ohne Höhenänderungen im Untersuchungsgebiet. Im Vergleich dazu ist die Verteilung der Höhenänderung im ersten Jahr bei der Kombination „RO-15 und RO-139“ homogener, zu erkennen an der klareren Abgrenzung zwischen den gelben und grünen Bereichen. Im Zeitraum 05/2016 – 05/2017 ist die ermittelte Höhenänderung der beiden Kombinationen mittels sich kreuzenden Tracks nahezu identisch. Im Vergleich zum vorherigen Zeitraum haben die Höhenänderungen zugenommen, was durch den orangenen Bereich im Zentrum ersichtlich ist. Dasselbe gilt auch für den letzten Zeitraum. Da die Höhenänderungszeitreihen aus den beiden kombinatorischen Berechnungen graphisch generell nicht groß voneinander abweichen (siehe z. B. Abbildung 67 und Abbildung 70c-d), könnte die Abweichung im ersten Jahr durch einen Unterschied in der Funktion, wegen eines stark abweichenden Messwertes (z. B. durch die große Datenlücke der Kombination „RO-15 und RO37“), zustande kommen.

Die Jahresscheiben der Ost-West-Bewegungskomponente in Abbildung 73 zeigen im ersten und letzten Jahr eine identische Ost-West-Bewegung, wobei im ersten Jahr „RO-15 und RO-139“ eine leicht höhere Anzahl an grünen Punkten aufweist. Diese leichte Abweichung verstärkt sich im zweiten Jahr, sodass die Ost-West-Bewegungskomponente im zweiten Jahr von „RO-15 und RO-139“ deutlich geringer ausfällt. Der Unterschied zwischen den beiden Ergebnissen besteht hauptsächlich in der Ausdehnung des Bewegungsgebietes. Die Beträge der von beiden Ergebnissen gezeigten Ost-West-Bewegungskomponente im zweiten Jahr sind allerdings ohnehin relativ klein, mit 2 mm bis 6 mm (gelbe Farbe). Im dritten Jahr zeigen beide Berechnungen identische Ergebnisse.

Die jährlichen Beträge der Höhenänderungen bzw. Ost-West-Bewegungen sind zwar in beiden kombinatorischen Ergebnissen jeweils von Jahr zu Jahr leicht verändert, wodurch sich die Ausdehnungen der Bewegungsgebiete ebenfalls mit der Zeit vergrößert und / oder verkleinert, dennoch sind keine Lageveränderung der Bewegungsschwerpunkte (z. B. Bereiche mit einer Senkung größer als 10 mm pro Jahr) in den Ergebnissen zu erkennen. Somit kann angenommen werden, dass

die durch die gesamten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen ermittelten Bewegungsschwerpunkte auch für die Zeiträume innerhalb des Untersuchungszeitraums gelten.

5.4.2 *Linien gleicher Höhenänderung und Ost-West-Bewegungskomponente*

Um den Umfang und die Bewegungsschwerpunkte der Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen zu erfassen, werden Isolinien für die gesamten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen abgeleitet. Durch die in Abbildung 85 und Abbildung 90 dargestellten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen sind die Messwerte trotz der Signifikanzprüfung relativ stark vermischt. Um die Linien gleicher Höhenänderung und Ost-West-Bewegung zu ermitteln, werden die Gitterpunkte, die jeweils signifikante gesamte Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen aufweisen, mittels des IDW-Verfahrens in Flächen interpoliert. Durch die IDW-Interpolation sollten die gitterbasierten Bodenbewegungskomponenten nur flächenhaft approximiert werden, was für die Ableitung von kontinuierlichen Isolinien vorteilhaft ist. Bei den kleinen Bewegungen, die sich im relativ großen Gebiet ausbreiten, wird ein Suchradius von 100 m verwendet, während die Rasterzellen mit einer Auflösung von 20 m x 20 m definiert sind. Die somit interpolierten Höhenänderungen werden in Abbildung 74 auf die Senkungsmulde fokussiert.

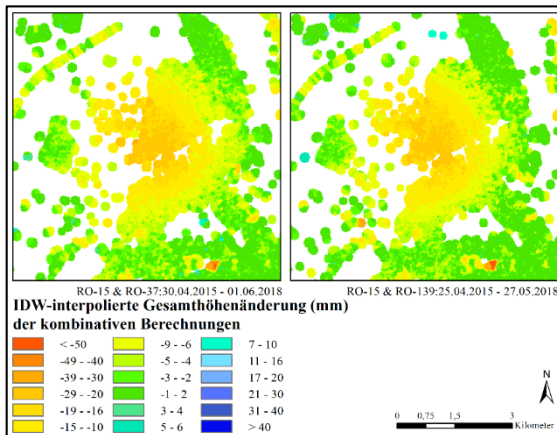


Abbildung 74: Fokussierte Darstellung der IDW-interpolierten Gesamthöhenänderung der kombinativen Berechnungen

Die beiden Senkungsmulden weisen in diesem vergrößerten Ausschnitt eine mittlere Differenz von 0,03 mm (mit einer Standardabweichung von 2,7 mm)

zueinander auf. Nur der von RO-15 und RO-139 ermittelte Senkungsbereich befindet sich geringfügig südlicher als der von RO-15 und RO-37. Ebenfalls werden die Ost-West-Bewegungen aus den beiden Kombinationen interpoliert und in Abbildung 75 dargestellt. Dabei sind die beiden Ergebnisse ebenfalls nahezu identisch (mit einer mittleren Differenz von 0,34 mm und einer Standardabweichung von 3,1 mm) und verfügen nur über wenige markant sichtbare Unterschiede.

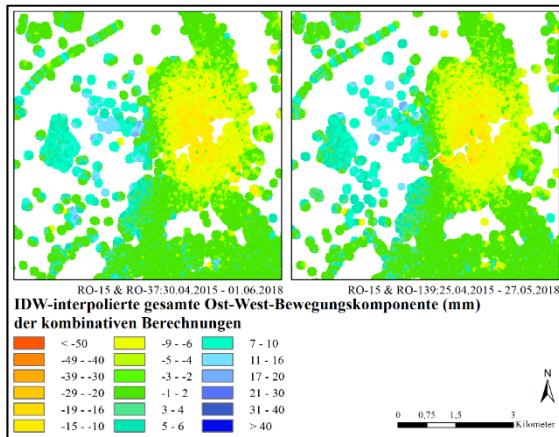


Abbildung 75 Fokussierte Darstellung der IDW-interpolierten gesamten Ost-West-Bewegungskomponente der kombinativen Berechnungen

Neben der Ähnlichkeit der Ergebnisse aus den beiden Kombinationen können noch die Inhomogenität der Flächeninterpolationsergebnisse festgestellt werden. Um möglichst kontinuierliche Isolinien zu erhalten, werden eine 4-fach iterative Tiefpass-Filterung für die interpolierten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen durchgeführt. Ein 3 x 3 Kernel wird für die Filterung eingesetzt, welcher nur die lokalen anomalen Rasterwerte in ihrer unmittelbaren Umgebung glättet, und die große geometrische Struktur der Senkungsmulde bzw. der Ost-West-Bewegungskomponente nur sehr wenig verändern soll. Die gefilterten gesamten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen stellen sich in Abbildung 76 dar.

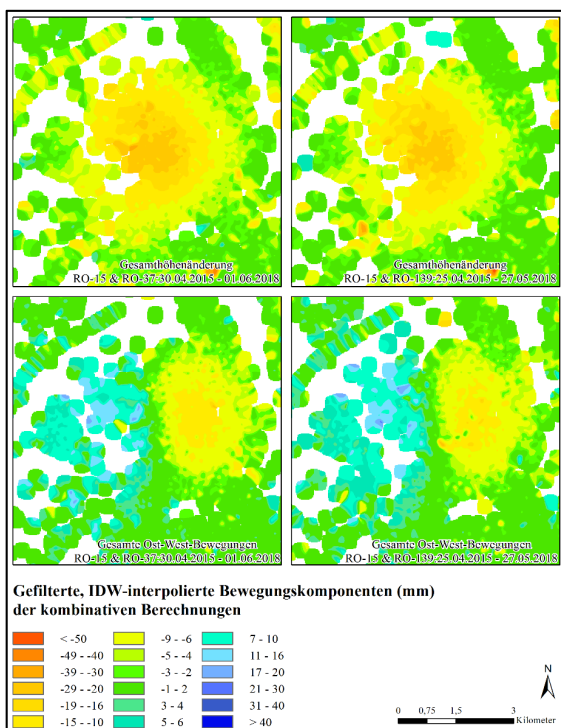


Abbildung 76: Mittels Tiefpasses gefilterte IDW-interpolierte Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen der kombinativen Berechnungen

In den östlichen Gebieten, wo ursprünglich bereits genügenden Gitterpunkte zur Verfügung stehen, wurde das Rauschen im Übergangsbereich von kleinen Bewegungen (mit gelber Farbe) zu keiner Bewegung (mit grüner Farbe) reduziert. Dies ist im westlichen Gebiet aufgrund der wenig zur Verfügung stehenden Gitterpunkte nicht der Fall. Zudem werden die daraus abgeleiteten Isolinien in Abbildung 77 dargestellt.

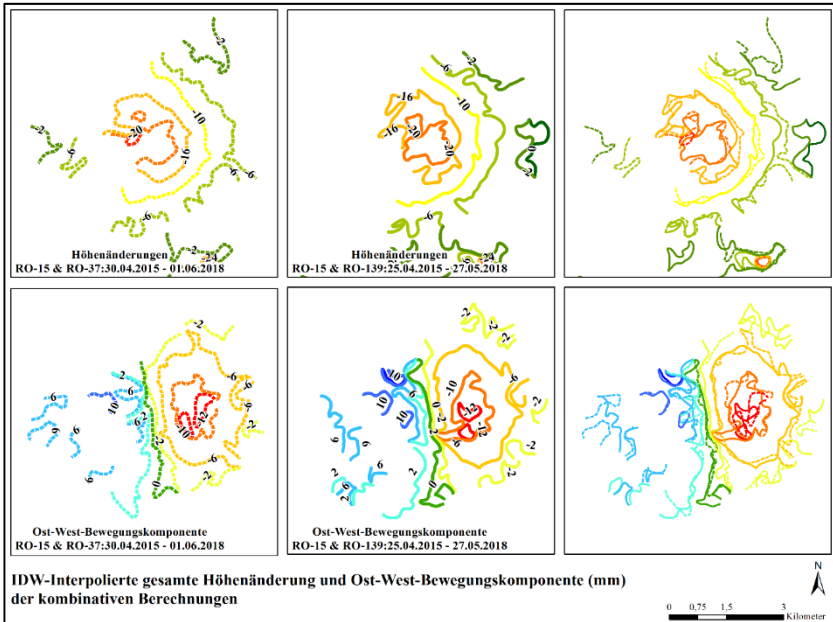


Abbildung 77: Isolinen Darstellung der Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen der kombinativen Berechnungen

Die Linien gleicher Höhenänderung werden in der oberen Zeile dargestellt, während die Linien gleicher Ost-West-Bewegungen in der unteren dargestellt sind. In den rechten Bildern jeder Zeile werden die Isolinen aus den beiden verschiedenen Kombinationen überlagert, womit ein direkter Vergleich der Lage der Bewegungsstrukturen ermöglicht wird. Dabei werden die Isolinen der beiden Kombinationen mit den identischen Farbskalen dargestellt, während die Isolinen der Kombination „RO-15 und RO-37“ gestrichelt sind.

Die überlagerten Darstellungen bestätigen, dass die aus den beiden Kombinationen ermittelten gesamten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen jeweils sehr ähnlich sind. Bei den Höhenänderungen kann nur wenig Versatz nach Südosten der Isolinen RO-15 und RO-37 (z. B. die orangen und hellgrünen Linien mit -16 mm und -6 mm) erkannt werden, während die restlichen korrespondierenden Linien jeweils zwar mit Schwankungen, aber sehr ähnliche Lagen dargestellt sind.

Bei der Ost-West-Bewegungskomponente sind die Unterschiede zwischen den Lagen der Linien noch geringer. Die Nulllinien der Ost-West-Bewegungskomponente in der Mitte der Senkungsmulde befinden sich an derselben Stelle, und differenzieren sich nur leicht voneinander am Ende der beiden Linien (mit

Abständen von 0 m bis maximal ca. 350 m). Die Nulllinien orientieren sich in der Nord-Süd-Richtung mit einer leichten Drehung nach Nordwesten und Südosten. Sie schneiden den durch die Isolinie von -20 m umkreisten inneren Senkungsbereich der Höhenänderung fast genau in der Mitte (vgl. die Linien gleicher Höhenänderungen in den oberen Bildern jeder Spalten in Abbildung 77).

5.4.3 Zeitliche Profile der Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen

Ein weiterer Untersuchungsansatz besteht in der Nutzung von Zeit-Bewegungsprofilen, welche die zeitliche Entwicklung des Bewegungsverlaufes entlang der gewählten Profilsuren darstellen. Mithilfe der in Kapitel 5.4.2 ermittelten Linien gleicher Höhenänderung und Ost-West-Bewegung wurden zwei Profilsuren (Abbildung 78) jeweils in der Nord-Süd- und Ost-West-Richtung bestimmt, die jeweils durch das Kerngebiet der Senkungsmulde gehen sollen. Auf der Grundlage der Gitterpunkte werden die Höhenänderungs- und Ost-West-Bewegungsverläufe entlang der beiden Profilsuren in jeweils um ein Jahr größere Zeitintervalle dargestellt.

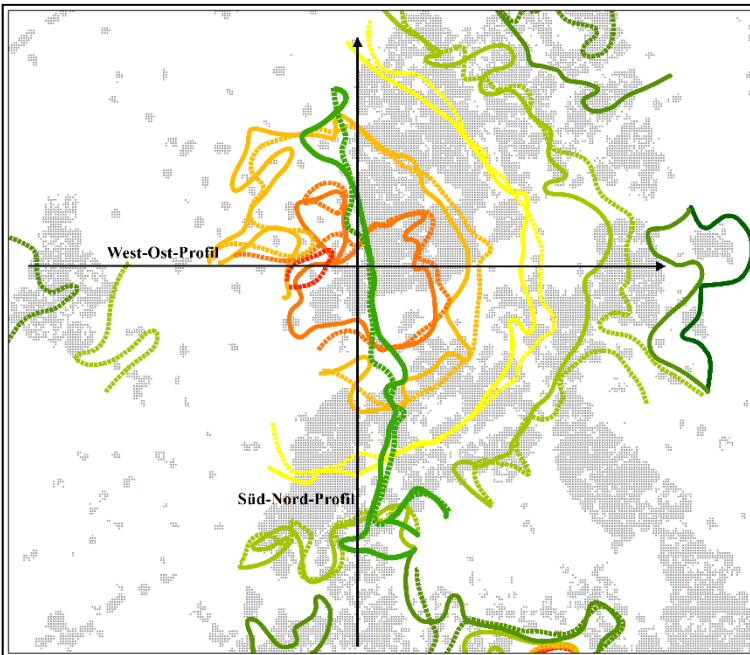
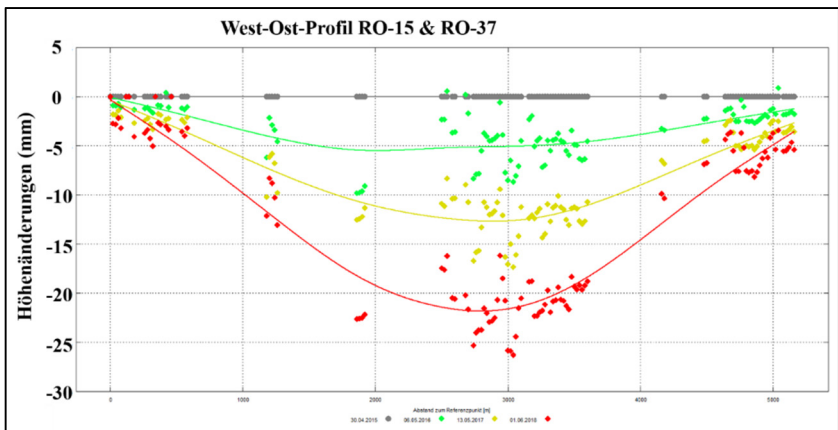


Abbildung 78: Angesetzte Profilsuren auf den überlagerten Ergebnissen der Isolinien Ermittlung

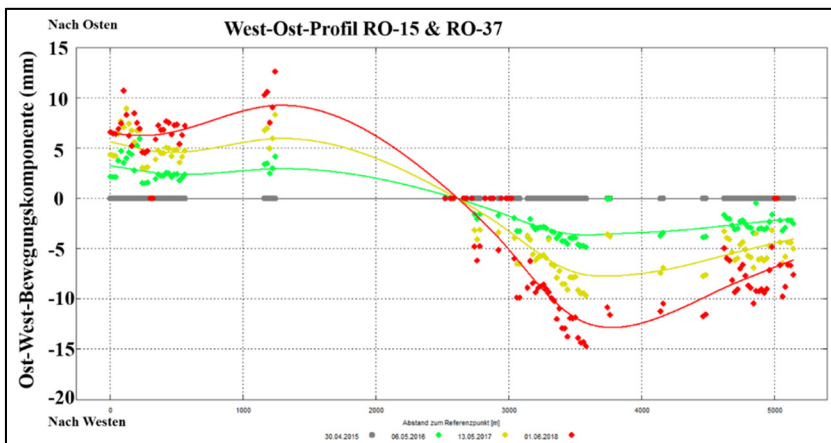
Hierbei werden die Gitterpunkte, die jeweils eine signifikante Gesamthöhenänderung oder gesamte Ost-West-Bewegungskomponente, für die Erstellung der Höhenänderungs- oder Ost-West-Bewegungsprofile verwendet. In Abbildung 78 werden beispielweise die Gitterpunkte mit signifikanten Gesamthöhenänderungen aus der Kombination „RO-15 und RO-37“ mit grauer Farbe dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Gitterpunkte nicht kontinuierlich zur Verfügung stehen. Z. B. im westlichen und nördlichen Teil der Senkungsmulde sind nur sehr wenige Gitterpunkte vorhanden. Um genügende Gitterpunkte über den ganzen Profilspreiz zusammenzustellen, müssen die Lagen der Profile auch unter Berücksichtigung der Gitterpunktverfügbarkeit festgelegt werden.

Die fortsetzenden Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen werden basierend auf deren ausgeglichenen Funktionswerten bzgl. des ersten Datums berechnet, dessen Bewegungen als die Nulllinien in den Profilen (graue Linie mit Punkten) dargestellt werden. In Abbildung 79 werden die Höhenänderungsprofile und Ost-West-Bewegungsprofile aus den zwei kombinatorischen Berechnungen dargestellt. Die Profile bestehen aus den funktionswertbasierten Messwerten (Punkte) und den daraus mittels Bezier-Splines⁸ approximierten Verlaufskurven (Linien).

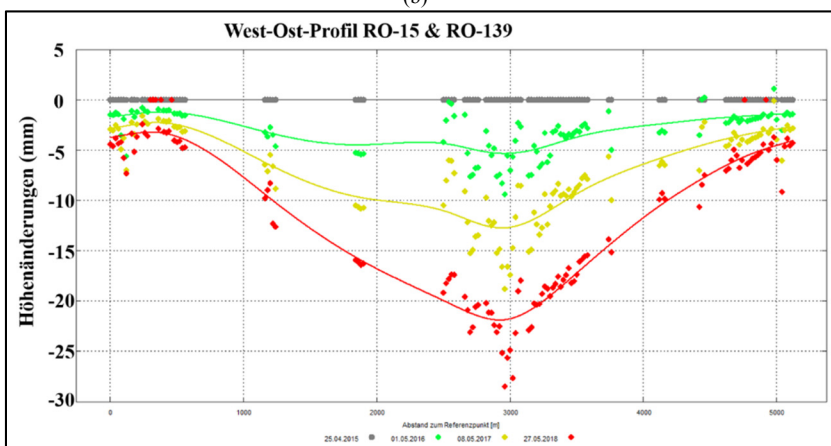


(a)

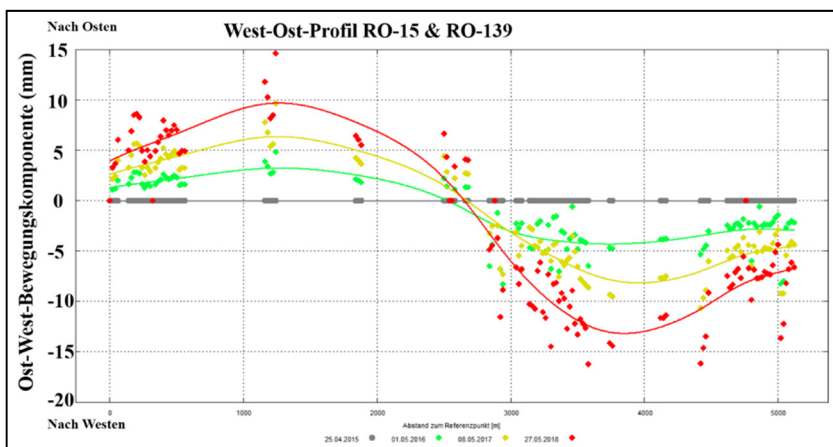
⁸ Die Bezier-Spline-Approximation wird als eine Darstellungshilfe mittel das am IGMC entwickelten GeoMon-Tool (Version 1.1.7) durchgeführt.



(b)



(c)



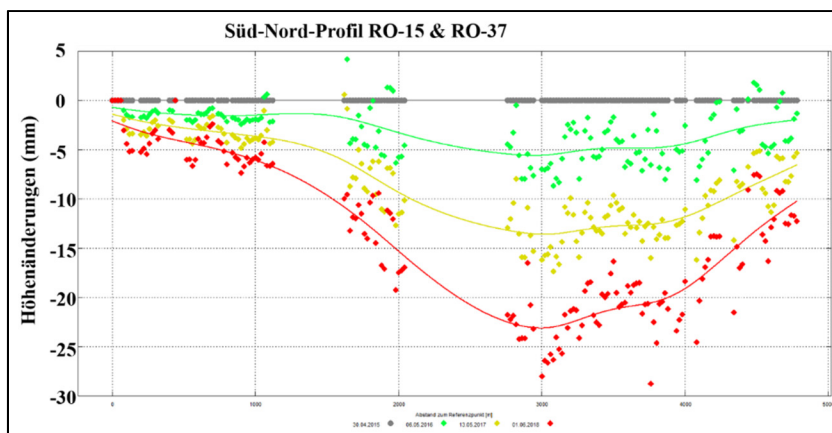
(d)

Abbildung 79: West-Ost-Profile der Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponenten für die kombinativen Berechnungen von RO-15 & RO-37 und RO-15 & RO-139

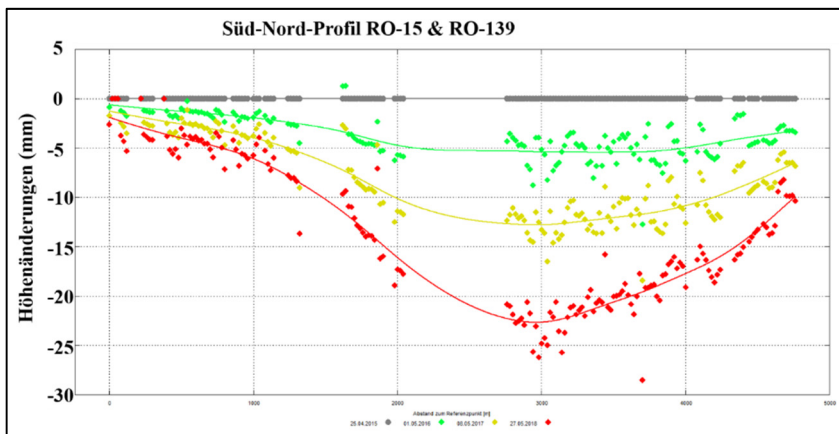
Die Höhenänderungsprofile in Abbildung 79a und c zeigen beide einen Senkungsschwerpunkt leicht westlich der Stelle, welche sich in 3000 m Entfernung zum Startpunkt des Profils im Westen befindet. Dies ist auch in den beiden Ost-West-Bewegungsprofilen durch die Schnittpunkte der Bewegungsverläufe und der Nullachse zu erkennen. Zudem befinden sich die Schnittpunkte der Nulllinie der gesamten Ost-West-Bewegungen und der West-Ost-Profilspur ca. 2.800 m östlich vom Startpunkt des Profils, also an der Stelle, wo die Ost-West-Bewegungsprofile gegen Null zeigen und die Höhenänderungsprofile deren maximale Senkung erreichen. Anhand der Kurven aus der Bezier-Approximation kann für RO-15 & RO-37 und RO-15 & RO-139 jeweils eine maximale Senkung von ca. 22 mm für drei Jahre (rote Kurve) abgelesen werden, und für die ersten zwei Jahre jeweils 5 mm und 13 mm. Die Senkungsgeschwindigkeit nimmt zum zweiten Jahr hin leicht zu. Die Bezier-approximierten Kurven von RO-15 & RO-37 wirken auf der östlichen Seite relativ abgerundet, während die Kurven von RO-15 & RO-139 dort relativ steil sind, allerdings weisen die funktionswertbasierten Messwerte (Punkte in den Profilen) der beiden Profile ähnliche Werte auf. Da die Ost-West-Profilspur durch die Senkungsmite gewählt wurde, sollte sie dementsprechend die maximale Ausdehnung in der Ost-West-Richtung indizieren. Hierbei ist an den beiden Enden des Profils keine Bodenruhe zu erkennen, während die weiteren Gitterpunkte nur mit großen Abständen vorhanden sind, ist die maximale Ausbreitung der Senkungsmulde in der Ost-West-Richtung mit über 5.000 m zu erwarten.

Durch die Ost-West-Bewegungsprofile können die maximale Ost-West-Bewegungskomponente nach Osten bei etwa 1.300 m zum Profilstart identifiziert werden, und die maximalen Ost-West-Bewegungskomponente nach Westen bei 3.700 m. Die maximale Ost-West-Bewegungskomponente nach Westen zeigt bei beiden Kombinationen identische Beträge von 4 mm, 7 mm und 13 mm in den jeweiligen Jahren. Die maximale Ost-West-Bewegungskomponente nach Osten weist auch bei beiden Kombinationen auf ähnlichen Beträgen jeweils bei ca. 3 mm, 6 mm und 10 mm, welche kleiner als die Horizontalbewegungen nach Westen sind. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Ost-West-Bewegungskomponente auf den beiden Seiten der Senkungsmulde nicht identisch ist, was in der Natur häufig der Fall ist. Der Unterschied zwischen den maximalen Beträgen ist allerdings sehr klein (im Durchschnitt kleiner als 3 mm). Unter Berücksichtigung der Standardabweichung der gesamten Ost-West-Bewegung könnte diese Differenz unterhalb der Signifikanzgrenze fallen.

Die weiteren Höhenänderungsprofile werden entlang der Süd-Nord-Profilspur in Abbildung 80 dargestellt. Auf dieser Profilsur sollte die Ost-West-Bewegung gegen Null verlaufen.



(a)



(b)

Abbildung 80: Süd-Nord-Profile der Höhenänderungen für die kombinativen Berechnungen von RO-15 & RO-37 und RO-15 & RO-139

Die Höhenänderungsprofile in Abbildung 80 zeigen beide einen mit 3.000 m Abstand zum sich im Süden befindenden Profilsstart. Dieser befindet sich in Abbildung 78 quasi auf dem Schnittpunkt der beiden Profilsuren. Anhand der Profilkurven kann für RO-15 & RO-37 und RO-15 & RO-139 jeweils eine maximale Senkung von ca. 23 mm für drei Jahre angegeben werden, und für die ersten zwei Jahre, ebenfalls identisch wie der West-Ost-Profil, jeweils 5 mm und 13 mm. Hierbei schwanken die funktionswertbasierenden Messwerte von „RO-15 & RO-37“ stärker, und somit könnten die maximalen Werte knapp 1 mm höher als die Höhenänderung von „RO-15 & -139“ abgelesen werden, insbesondere ab dem zweiten Jahr (gelbe und rote Höhenänderungsverläufe).

Die Senkungsgeschwindigkeit vom ersten Jahr hin zum zweiten nimmt leicht zu. Da im Norden nicht genügend Gitterpunkte zur Verfügung stehen, kann auf dieser Profilsur kein vollständiger Höhenänderungsverlauf dargestellt werden. Allerdings zeigt der südliche Teil der Höhenänderungsverläufe der beiden Kombinationen eine ähnliche Neigung vom Senkungsrand bis zur Senkungsmittle wie die östliche Seite der West-Ost-Profile in Abbildung 79a und c.

6 Qualität der kombinativen Berechnungen

In dieser Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf die Untersuchung über die Qualität der kombinativ berechneten Ergebnisse gelegt, indem sowohl die statistischen Unsicherheiten der berechneten Bewegungskomponenten, als auch die systematischen Abweichungen bzgl. der in Kapitel 4 vorgestellten Theorien analysiert werden.

Zunächst werden die statistischen Unsicherheiten basierend auf den Zeitreihen von den eingegangenen PSI-Ergebnissen und den kombinativ berechneten Bewegungskomponenten untersucht (Kapitel 6.1). Es wird folglich der Nachweis der theoretisch abgeleiteten Zusammenhänge zwischen den Eingangsdaten (PSI-Ergebnisse) für die kombinatorische Berechnung und den berechneten Bewegungskomponenten erbracht. Ferner wurden in Kapitel 4.3 und 4.4 die Empfehlung zur Konstellationsauswahl für die kombinativen Berechnungen zwecks der Reduktion der statistischen Unsicherheit formuliert. In diesem Kapitel sollen diese Aussagen im Rahmen der verfügbaren Daten aus Sentinel-1 nachgewiesen werden.

Für die weitere Betrachtung der Qualität wird die Größenordnung der systematischen Abweichungen bestimmt, um daraufhin anhand der Nord-Süd-Bewegungskomponente ortsspezifische systematische Abweichungen abzuschätzen (Kapitel 6.2 u. 6.3). Wie in Kapitel 4 bereits erwähnt, können die mittels sich kreuzender Tracks kombinativ berechneten Bodenbewegungskomponenten, d. h. die Höhenänderung und Ost-West-Bewegungskomponente, aufgrund der Vernachlässigung der Nord-Süd-Bewegungskomponente noch systematische Abweichungen enthalten. Angesichts der in Kapitel 5 ermittelten zweidimensionalen Bodenbewegungskomponenten für die Höhenänderung und Ost-West-Bewegung führt nun der Blick hin zur Betrachtung der systematischen Abweichungen.

Um sich diesem Problem zu nähern, gilt weiterhin der in Kapitel 4.3 bereits dargelegte Zusammenhang, dass die systematischen Abweichungen in den Ergebnissen der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks aus der Multiplikation der konstellationsbedingten ε -Faktoren und der Nord-Süd-Bewegungskomponente an dem betrachteten Gitterpunkt bestehen. Für diese beiden Eingangsgrößen gelten unterschiedliche Abhängigkeiten. Hierbei ist zu bemerken, dass aufgrund der Charakteristiken der Bodenbewegung die Nord-Süd-Bewegungskomponente eine orts- und zeitabhängige Größe ist, während die ε -Faktoren, bedingt durch die Masterszenen der jeweiligen PSI-Auswertungen, nur eine Ortsabhängigkeit aufweisen. Als Folge dieser Situation lässt sich schließen,

dass die systematischen Abweichungen in den ermittelten Bewegungskomponenten auch räumlich und zeitlich variierende Größen sind. Bezieht sich die Abschätzung der systematischen Abweichungen auf einem bestimmten Zeitraum, verbleibt für diesen Zeitraum nur die räumliche Variation der zeitraumspezifischen, systematischen Abweichung zu erfassen.

Die Herausforderung bei der Abschätzung von systematischen Abweichungen liegt nicht nur an der möglichen raumzeitlichen Vielfalt dieser Größen, sondern auch an der unbekannten tatsächlichen Nord-Süd-Bewegungskomponente. Hierfür müssen Annahmen aus den Modellvorstellungen des Fallbeispiels getroffen werden, um die unbekannte Nord-Süd-Bewegungskomponente abzuschätzen.

Nichts desto trotz spielt in der Praxis auch die Größenordnung der Abweichungen eine wichtige Rolle. Daher sollen die abgeschätzten systematischen Abweichungen im Kontext mit den kombinatorisch berechneten Bewegungskomponenten auf ihre Signifikanz hin bewertet werden.

Somit werden für die Abschätzung von systematischen Abweichungen die folgenden Ziele gesetzt:

1. Ermittlung der räumlichen Verteilungen der ε -Faktoren.
2. Darlegung einer Modellvorstellung als Grundlage für die weiteren Abschätzungen.
3. Abschätzung der Beträge der maximalen systematischen Abweichungen für das Fallbeispiel mithilfe der ε -Faktoren und Annahmen aus der Modellvorstellung.
4. Abschätzung der Nord-Süd-Bewegungskomponente mithilfe der Modellvorstellungen und den bereits ermittelten Bodenbewegungskomponenten.
5. Berechnung der ortsabhängigen systematischen Abweichungen mittels der ermittelten Nord-Süd-Bewegungen und ε -Faktoren.

6.1 Statistische Qualität der Ergebnisse

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 repräsentiert die Standardabweichung eines einzelnen, mit den PSI-Ergebnissen und den durch kombinatorische Berechnungen ermittelten Beobachtungswertes (Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponente). Dies widerspiegelt die Messwertschwankung einer Zeitreihe bzgl. der ihr angepassten Polynomfunktion (Busch & Linke, 2014). Deren Abhängigkeit für die PSI-Auswertung liegt u. a. beim jeweiligen Radarsensor, der übergeordneten Datensatzqualität. Darüber hinaus hängt die

Qualität der kombinativen Berechnungen auch von der verwendeten Konstellation, bzw. Berechnungsmethode (vgl. Kapitel 4.3.3 und Kapitel 4.4.3) ab. Mit diesem statistischen Merkmal kann die statistische Unsicherheit einer Zeitreihe, nämlich die innere Genauigkeit, bewertet werden.

Ein weiteres statistisches Merkmal ist die Standardabweichung der ausgeglichenen Beobachtungen (Funktionswerte). Da zur Berechnung der Höhenänderungsdifferenzen die Funktionswerte der Trendfunktionen (z. B. der erste und letzte ausgeglichene Höhenänderungswert einer Zeitreihe) für die gitterbasierten Zeitreihen benutzt werden, ergibt sich die Standardabweichung einer Höhenänderungsdifferenz mit dem Varianzfortpflanzungsgesetz (Niemeier, 2008) auf Grundlage der Standardabweichungen der beiden ausgeglichenen Funktionswerte (Busch, et al., 2018). Dies wird bei der Signifikanzermittlung von einer kombinativ berechneten Bewegungskomponente in bestimmten Zeiträumen berücksichtigt.

6.1.1 Statistische Unsicherheit der kombinativ berechneten Höhenänderungen

Die mittels der Polynomausgleichungen abgeleitete Standardabweichung s_0 einer kombinativ berechneten Höhenänderung ist, wie bereits erwähnt, ein Maß für die erreichte Messgenauigkeit. Die räumliche Verteilung der Standardabweichung s_0 stellt sich in Abbildung 81 für die drei der kombinativ berechneten Höhenänderungen dar. Zudem werden die entsprechenden Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 82 dargelegt.

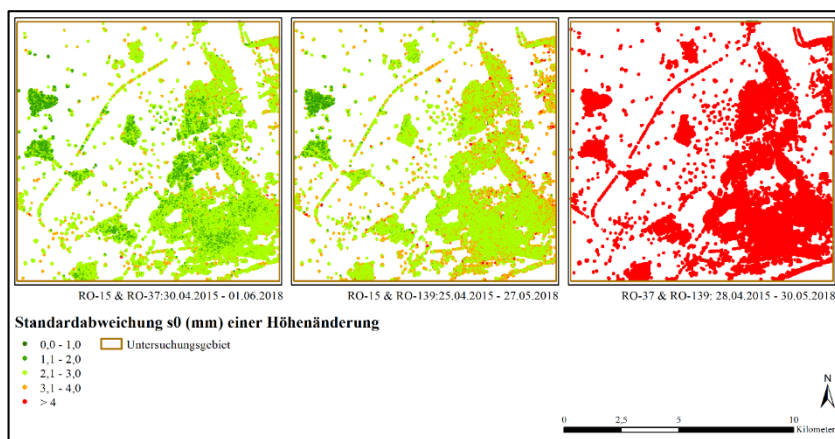
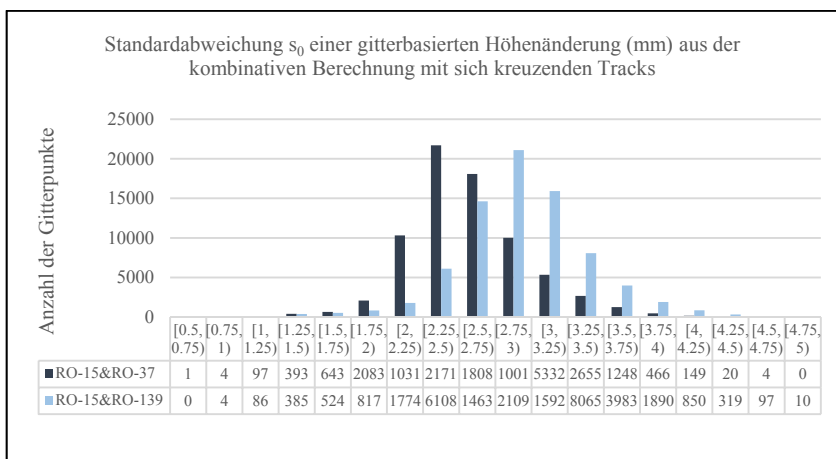
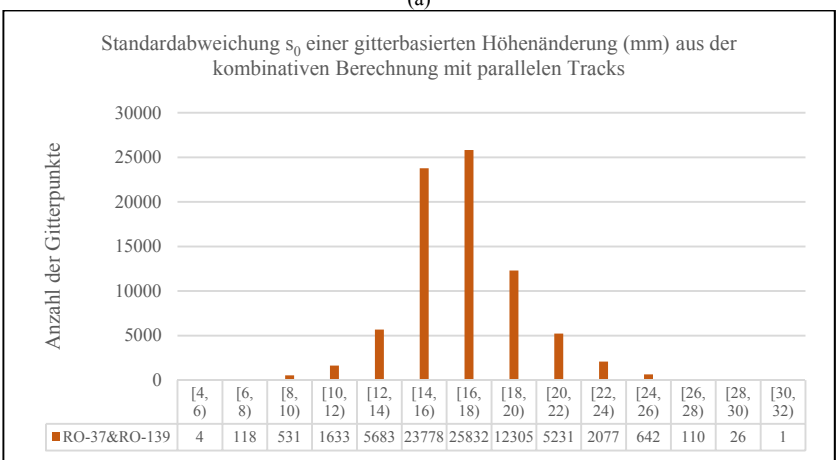


Abbildung 81: Räumliche Verteilung der Standardabweichung s_0 der Höhenänderungen der jeweiligen kombinativen Berechnung



(a)



(b)

Abbildung 82: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung einer gitterbasierten Höhenänderung (mm) aus der kombinativen Berechnung (a) mit sich kreuzenden Tracks; (b) mit parallelen Tracks

Ein deutlicher Qualitätsunterschied zwischen den kombinativen Berechnungen mit sich kreuzenden und parallelen Tracks ist aus Abbildung 81 zu erkennen, woraus hervorgeht, dass die Höhenänderungszeitreihen aus den kombinativen Berechnungen mit parallelen Tracks eindeutig eine höhere Standardabweichungen aufweisen. Denselben Eindruck bestätigen auch die Zeitreihen in Abbildung 67. Die kleinste Standardabweichung einer somit ermittelten Höhenänderung liegt bei ca. 3,7 mm, und die größte bereits bei 24,3 mm. Aus der Häufigkeitsverteilung in Abbildung 82b kann ca. 79,4 % dieser Zeitreihen mit der Genauigkeit von 14 mm bis 20 mm angegeben werden. Im Vergleich dazu befinden sich

die Standardabweichungen der anderen zwei Ergebnisse in einem viel niedrigeren Wertbereich von unter 5 mm. Die Ergebnisse in Abbildung 81 lassen auch den Schluss zu, dass die Standardabweichungen der mit Kombination von RO-15 und RO-37 ermittelten Höhenänderungszeitreihen etwas besser als die mittels RO-15 und RO-139 bestimmten sind. Die räumliche Verteilung der Standardabweichungen ist für beide Auswertungen relativ homogen. Die Genauigkeit einer kombinatativ berechneten Höhenänderung mit sich kreuzenden Tracks für diesen Untersuchungsraum kann entsprechend Abbildung 82a für 82,1 % der Zeitreihen von der Kombination „RO-15 und RO-37“ mit etwa 2 mm bis 3 mm, und 86,0 % der Zeitreihen von der Kombination „RO-15 und RO-139“ mit 2,25 mm bis 3,25 mm angegeben werden. Zur Ergänzung des Verständnisses über die Verteilungen werden einige charakteristische Mittelwerte der Standardabweichung einer Höhenänderung in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Statistische Parameter (gerundet) der Standardabweichungen s_0 einer kombinatativ berechneten Höhenänderung

| | RO-15 & RO-37 | RO-15 & RO 139 | RO-37 & RO-139 |
|---------------------------|---------------|----------------|----------------|
| Median von s_0 (mm) | 2,2 | 2,7 | 14,5 |
| Mittelwert von s_0 (mm) | 2,3 | 2,7 | 14,7 |

In Kapitel 4.3.3 und Kapitel 4.4.3 wurden bereits erläutert, dass die statistische Unsicherheit der kombinativen Berechnungen bei verschiedenen Kombinationen von Konstellationen voneinander unterscheiden. Um die Unterschiede bei diesem Fallbeispiel nachzuvollziehen, werden die theoretischen Ableitungen der Standardabweichungen nach Formel (4-29) und (4-38) in den folgenden Schritten für die drei Fälle abgeleitet. Hierbei werden für die Beispielberechnung zunächst die mittleren Einfallswinkel eingesetzt. Dies kann allerdings die konstellationsbedingten ς_Z -Faktoren des Untersuchungsgebietes bereits repräsentieren, weil die Variation der Einfallswinkel innerhalb des Untersuchungsgebietes kleiner als $0,9^\circ$ ist.

Bei der kombinativen Berechnung mit RO-15 ($\bar{\theta}_{l,RO15} = 41,6^\circ$) und RO-37 ($\bar{\theta}_{l,RO37} = 31,5^\circ$):

$$s_{d_Z,(RO15\&RO37)}^2 = 0,29 \cdot s_{LOS,RO15}^2 + 0,49 \cdot s_{LOS,RO37}^2 \quad (6-1)$$

Bei der kombinativen Berechnung mit RO-15 ($\bar{\theta}_{l,RO15} = 41,6^\circ$) und RO-139 ($\bar{\theta}_{l,RO139} = 40,0^\circ$):

$$s_{d_Z,(RO15\&RO139)}^2 = 0,42 \cdot s_{LOS,RO15}^2 + 0,45 \cdot s_{LOS,RO139}^2 \quad (6-2)$$

Bei der kombinatorischen Berechnung mit RO-37 ($\bar{\theta}_{i,RO37} = 31,5^\circ$) und RO-139 ($\bar{\theta}_{i,RO139} = 40,0^\circ$):

$$s_{d_{Z,(RO37\&RO139)}}^2 = 18,9 \cdot s_{LoS,RO37}^2 + 12,5 \cdot s_{LoS,RO139}^2 \quad (6-3)$$

Die ζ_Z -Faktoren in den Gleichungen (6-1) - (6-3) bestätigen zunächst die enorme Differenz an Standardabweichung einer Höhenänderung zwischen den Ergebnissen aus den parallelen und sich kreuzenden Tracks. Anhand der statistischen Betrachtung der ursprünglichen PSI-Ergebnisse in Kapitel 5.2.2 kann die mittlere Standardabweichung einer LoS-Bewegung für das PSI-Ergebnis von RO-15 mit ca. 3,4 mm, RO-37 mit 2,8 mm bzw. RO-139 dann mit 3,3 mm angegeben werden. Werden diese mittleren Standardabweichung einer LoS-Bewegung dementsprechend in den Gleichungen (6-1) - (6-3) eingesetzt, lassen sich dann die Standardabweichungen einer kombinatorisch berechneten Höhenänderung der drei Kombinationen nach Formel (4-29) und (4-38) jeweils wie folgt berechnen:

$$s_{d_{Z,(RO15\&RO37)}} = \sqrt{0,29 \cdot 3,4^2 + 0,49 \cdot 2,8^2} \approx 2,7 \text{ mm} \quad (6-4)$$

$$s_{d_{Z,(RO15\&RO139)}} = \sqrt{0,42 \cdot 3,4^2 + 0,45 \cdot 3,3^2} \approx 3,1 \text{ mm} \quad (6-5)$$

$$s_{d_{Z,(RO37\&RO139)}} = \sqrt{18,9 \cdot 2,8^2 + 12,5 \cdot 3,3^2} \approx 16,9 \text{ mm} \quad (6-6)$$

Im Vergleich zu den in Tabelle 11 angegebenen mittleren Standardabweichungen sind die nach der Theorie berechneten Werte jeweils leicht erhöht. Eine Erklärung für die Unterschiede ist dabei, dass das Messrauschen in den gitterbasierten LoS-Zeitserien durch die Flächeninterpolation bereits reduziert wurde, und die somit tatsächlich bei den kombinatorischen Berechnungen eingegangenen, gitterbasierten LoS-Zeitserien kleinere Standardabweichung als die LoS-Zeitserien aus den ursprünglichen PSI-Ergebnissen aufweisen.

Nichts desto trotz stimmt die Berechnung der ζ_Z -Faktoren bzw. den nach der Theorie berechneten Standardabweichungen mit der statistischen Analyse über die kombinatorisch berechneten Höhenänderungen tendenziell überein. Bei der kombinatorischen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks entsteht ein kleinerer konstellationsbedingter ζ_Z -Faktor für die eingegangene LoS-Bewegung von RO-15 durch die steiler blickende Aufnahmegeometrie, wie auch den kleineren Azimut der Blickrichtung vom RO-37 (größere $\theta_{i,RO37}$ und kleinere $\|\alpha_{ald,RO37}\|$). Somit ist hier die gesamte statistische Unsicherheit $s_{d_{Z,(RO15\&RO37)}}$ bereits am geringsten aus den zur Verfügung stehenden Kombinationen. Hinzukommend besitzt das PSI-Ergebnis vom RO-37 eine höhere Qualität, welche die gesamte statistische Unsicherheit $s_{d_{Z,(RO15\&RO37)}}$ weiterhin reduziert. Diese statistische Unsicherheit $s_{d_{Z,(RO15\&RO37)}}$ wird erst größer als $s_{d_{Z,(RO15\&RO139)}}$ wenn die Standardabweichung einer LoS-Bewegung von RO-37 größer als ca. 3,6 mm wäre.

Der durch die Wahl einer günstigen Konstellation verschaffte Vorteil der statistischen Qualität ist bei den mittels kreuzenden Tracks kombinativ berechneten Höhenänderungen untereinander zwar eindeutig, aber nicht groß. Im Vergleich dazu zeigt die Differenz zwischen den nach der Theorie berechneten statistischen Unsicherheiten der zwei Arten der kombinativen Berechnungen, dass der Unterschied zwischen den ζ_Z -Faktoren der beiden Verfahren für die Größenordnungen der jeweiligen Standardabweichungen maßgeblich ist. Die nach der Theorie berechneten Standardabweichung der mittels RO-37 und RO-139 kombinativ berechneten Höhenänderungen stimmt auch mit der tatsächlichen mittleren Standardabweichung einer Höhenänderung tendenziell überein, wobei die vermutlich durch die Flächeninterpolation ergebende Verbesserung an der Qualität der gitterbasierten Höhenänderung deutlich zu erkennen ist. Unter Nutzung von parallelen Tracks spielt die Differenz zwischen den Einfallswinkeln der beiden verwendeten Aufnahmegeometrie die größte Rolle (vgl. Kapitel 4.4.3). Hierbei beträgt diese Differenz der beiden Einfallswinkel ca. $8,5^\circ$. Würde diese Differenz auf 10° erhöht, z. B. durch die Erhöhung vom flacheren Einfallswinkel auf $41,5^\circ$, welche für die Erhöhung des oberen Terms des ζ_Z -Faktors sorgen würde, sinken die beiden ζ_Z -Faktoren jedoch auf 14,5 und 9,1. Dies zeigt auf der einen Seite die große Verbesserungsmöglichkeit an der statistischen Qualität durch den kleinen Unterschied des Einfallswinkels, auf der anderen Seite die Empfindlichkeit der statistischen Qualität von diesem Verfahren gegenüber der Winkelgenauigkeit der Eingangsparameter, was für die Umsetzung dieses Verfahren eine zusätzliche Herausforderung darstellt.

Eine weitere Nutzung der konstellationsbedingten ζ_Z -Faktoren schließt sich an der Vorausberechnung der mindestens erforderlichen statistischen Qualität der PSI-Ergebnisse für eine Qualitätsanforderung an den kombinativ berechneten Ergebnissen an. Ausgegangen von einer identischen Qualität von den eingegangenen PSI-Zeitreihen, wenn die zu ermittelnden Höhenänderungszeitreihen eine mittlere Standardabweichung unterhalb 2 mm erreichen sollten, müssen bei der kombinativen Berechnung mit RO-15 und RO-139 die PSI-Ergebnisse jeweils eine mittlere Standardabweichung von unter 2,0 mm aufweisen, bei RO-15 und RO-37 folglich 2,3 mm. Dieselbe Anforderung an die mittlere Standardabweichung verlangt beim Ansatz der kombinativen Berechnung mit parallelen Tracks RO-37 und RO-139 jedoch eine maximale mittlere Standardabweichung von unter 0,36 mm, welche deutlich schwieriger zu erreichen ist. Die mögliche Maßnahme könnte hierfür eine stark glättende Modellierung der Eingangszeitreihen von PSI-Ergebnissen sein.

Wenn eine mittlere Qualität der PSI-Ergebnisse bei einem bestimmten Niveau, z. B. 3 mm, liegen würde, könnte die potentielle mittlere Standardabweichung

für die Kombination von RO-15 und RO-37 mit kleiner als 2,6 mm geschätzt werden, ohne die kombinatorische Berechnung durchzuführen. Dieses Potential könnte bei denselben Bedingungen für die Kombination von RO-15 und RO-139 mit kleiner als 2,9 mm bzw. bei RO-37 und RO-139 mit 16,8 mm geschätzt werden.

Hierbei ist es zu beachten, dass die Abschätzung der mittleren Standardabweichung der kombinatorischen Berechnungen nur die durchschnittlichen Beträge der tatsächlichen statistischen Unsicherheit indizieren kann. Bei Einzelzeitreihen der kombinatorischen Berechnung können die Standardabweichungen davon abweichen. Außerdem kann die mittlere Standardabweichung deren Verteilung über alle gitterbasierten Zeitreihen nicht vollständig widerspiegeln, wodurch die tatsächlichen Mittelwerte der Standardabweichungen auch beeinflusst werden.

Wie es bereits am Anfang des Kapitels erwähnt wurde, ergibt sich durch die Trendpolynomausgleichung die Standardabweichung der ausgeglichenen Beobachtungen, womit durch das Varianzfortpflanzungsgesetz die Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen berechnet werden können. Abbildung 83 stellt die räumliche Verteilung der Standardabweichung der gitterbasierten Höhenänderungsdifferenz zwischen dem ersten und letzten Datum dar. Die Histogramme in Abbildung 84 zeigen die klassenbezogene Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen für alle gitterbasierten Höhenänderungszeitreihen im Untersuchungsraum.

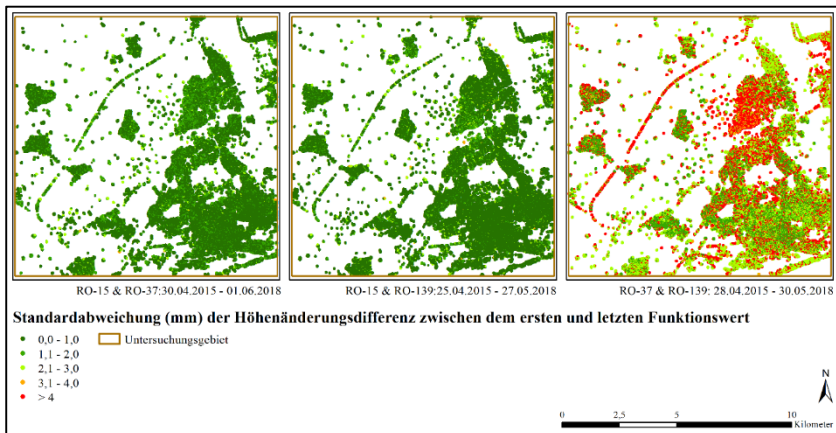
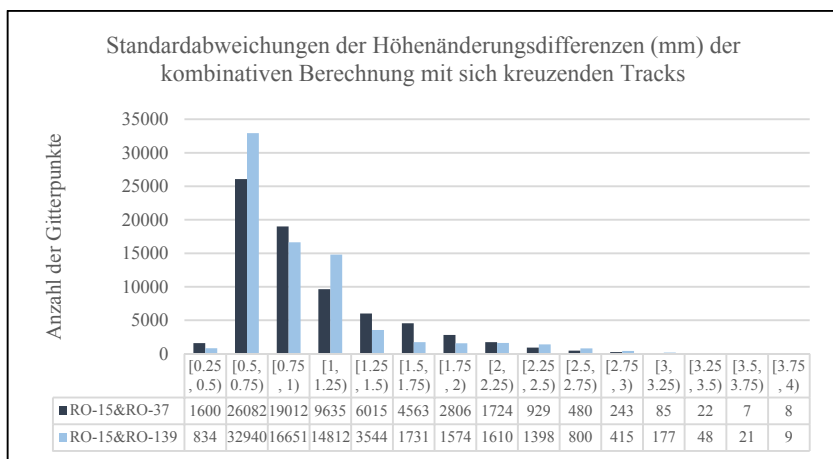
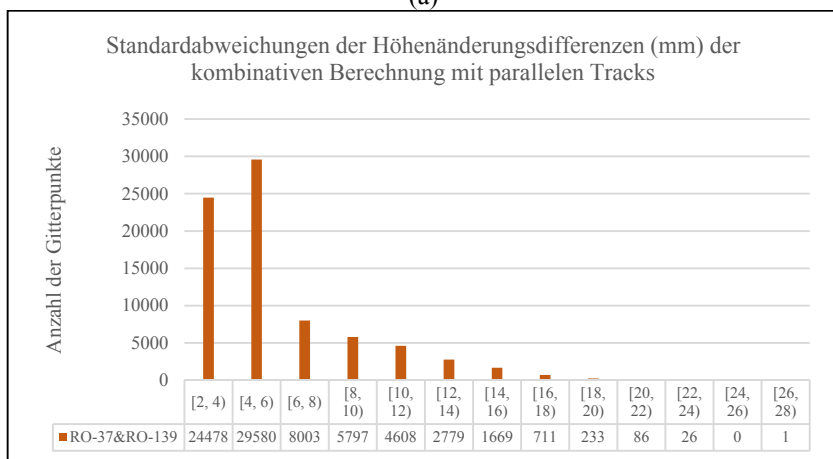


Abbildung 83: Räumliche Verteilung der Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen (mm)



(a)



(b)

Abbildung 84: Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen abgeleitet aus dem jeweils ersten und letzten Funktionswert der Trendfunktion einer Zeitreihe und ihren Standardabweichungen

Im Mittel ergibt sich für die Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen der Kombination zwischen RO-15 und RO-37 bzw. mit RO-15 und RO-139 ein sehr ähnlicher Wert von 0,7 mm. Dieser liegt bei der Kombination von RO-37 und RO-139 bei 3,9 mm.

Diese Standardabweichung bietet zunächst die Möglichkeit an, die Signifikanz der funktionswertbezogenen Gesamthöhenänderung im Hinblick auf ihrer Standardabweichung zu beurteilen. Die Signifikanz einer berechneten Höhenänderungsdifferenz kann mit Hilfe des Quotienten aus der Höhenänderungsdifferenz

und seiner Standardabweichung berechnet werden. Bei Festlegung einer Signifikanzschwelle von 99 % kann der Betrag des Quotienten größer 2,57 angenommen werden, damit die Höhenänderungsdifferenz als signifikant bezeichnet werden kann. Wenn die funktionswertbezogenen Gesamthöhenänderung größer als die Multiplikation von ihrer Standardabweichung und dem Quotienten ist, wird sie als signifikant betrachtet.

Die Anwendung dieses Tests auf alle Zeitreihen ergab, dass 9.279 Gitterpunkte (ca. 12,7 %) der Kombination von RO-15 und RO-37 nicht signifikante Höhenänderungsdifferenzen aufweisen, 5.653 Gitterpunkte (7,4 %) der Kombination von RO-15 und RO-139 und 12.981 Gitterpunkte (16,6%) der Kombination von RO-37 und RO-139. In Abbildung 85 werden die signifikanten Gesamthöhenänderungen für den Zeitraum 04/2015 – 05/2018 dargestellt. Dabei ist allerdings keine markante Veränderung gegenüber der in Abbildung 66 dargestellten Höhenänderung zu bemerken.

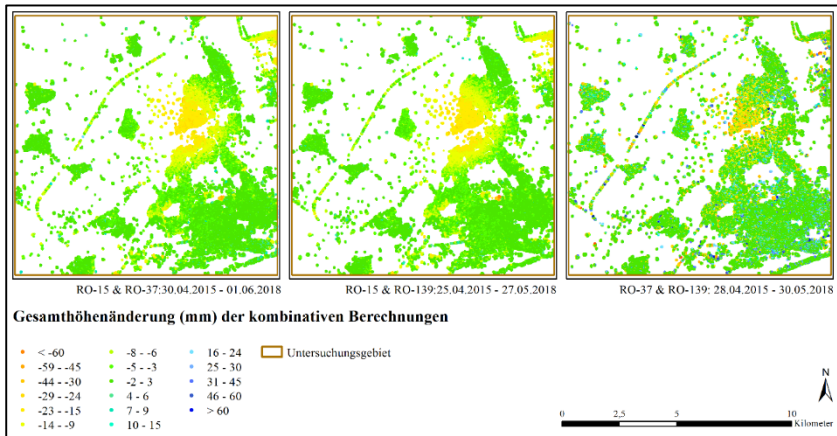


Abbildung 85 Mittels der Trendpolynomfunktion abgeleitete, signifikante Gesamthöhenänderung im Zeitraum 04/2015 – 05/2018 aus den kombinativen Berechnungen

Zudem kann durch die Standardabweichung der Höhenänderungsdifferenz näherungsweise größenordnungsmäßig die mindeste Gesamthöhenänderung (für den Zeitraum 04/2015 – 05/2018) geschätzt werden, die als signifikant bezeichnet werden könnte. Geht man von den oben genannten Standardabweichungen von 0,7 mm für die beiden kombinativen Berechnungen mit sich kreuzenden Tracks aus, müsste eine so ermittelte „signifikante“ Gesamthöhenänderung unter Berücksichtigung einer Signifikanzschwelle von 99 % größer als ca. 1,7 mm, aufgerundet, 2 mm betragen. Die Signifikanzgrenze gilt für die mit parallelen Tracks kombinativ berechnete Gesamthöhenänderung mit einem mindesten Wert von 10 mm.

6.1.2 Statistische Unsicherheit der kombinativ berechneten Bewegungskomponente in der Ost-West-Richtung

Dieselben Merkmale der statistischen Qualität können auch für die kombinativ berechneten Zeitreihen der Ost-West-Bewegungskomponente abgeleitet werden. Hierbei sind nur die kombinativen Berechnungen mit sich kreuzenden Tracks betroffen. Die mittels der Polynomausgleichungen abgeleiteten Standardabweichung s_0 einer kombinativ berechneten Ost-West-Bewegungskomponente stellt sich in Abbildung 86 dar. Zusätzlich werden die entsprechenden Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 87 dargelegt.

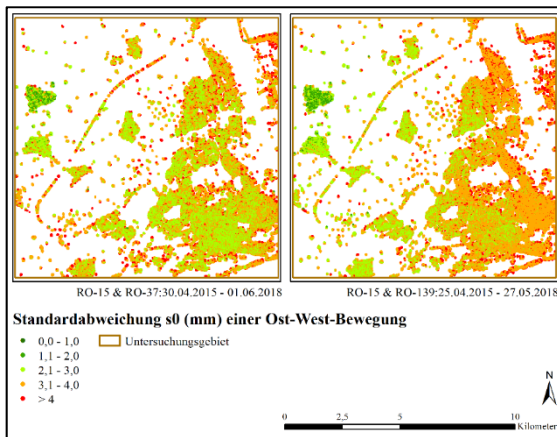


Abbildung 86: Räumliche Verteilung der Standardabweichung s_0 der Ost-West-Bewegungskomponenten der beiden kombinativen Berechnung

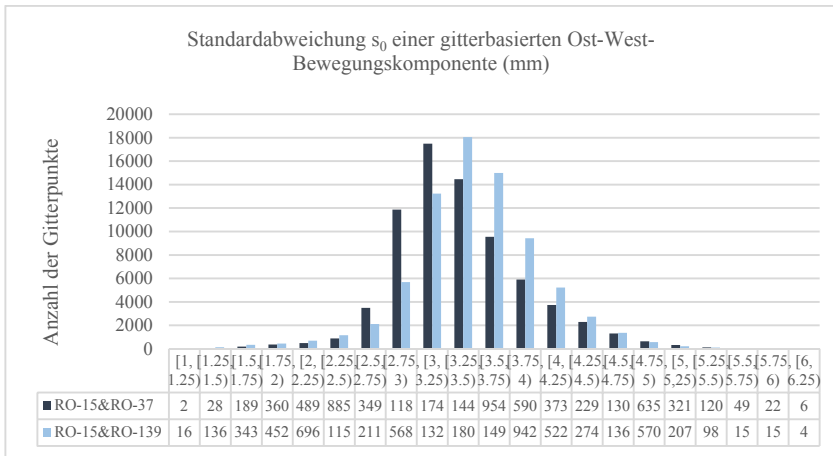


Abbildung 87: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung einer gitterbasierten Ost-West-Bewegungskomponente (mm)

In Abbildung 87 ist nur ein kleiner Unterschied an den statistischen Qualitäten der beiden gitterbasierten Ost-West-Bewegungen zu erkennen. Die Standardabweichung einer Ost-West-Bewegungskomponente aus der Kombination von RO-15 und RO-37 ist geringfügig kleiner als die aus der Kombination von RO-15 und RO-139. Denselben Eindruck bestätigt auch die etwas größere grüne Fläche des linken Bildes in Abbildung 86. Die Genauigkeit einer kombinatativ berechneten Ost-West-Bewegungskomponente für den Untersuchungsraum kann entsprechend Abbildung 87 für 81,1 % der Zeitreihen von der Kombination „RO-15 und RO-37“ mit etwa 2,75 mm bis 4 mm, und 87,0 % der Zeitreihen von der Kombination „RO-15 und RO-139“ mit 2,75 mm bis 4,25 mm angegeben werden. Zur Ergänzung des Verständnisses über die Verteilungen werden einige charakteristische Mittelwerte der Standardabweichung einer Ost-West-Bewegungskomponente in Tabelle 11 dargelegt.

Tabelle 12: Statistische Parameter (gerundet) der Standardabweichungen s_0 einer kombinatativ berechneten Ost-West-Bewegungskomponente

| | RO-15 & RO-37 | RO-15 & RO-139 |
|---------------------------|---------------|----------------|
| Median von s_0 (mm) | 3,0 | 3,2 |
| Mittelwert von s_0 (mm) | 3,1 | 3,2 |

Im Vergleich zu den Standardabweichungen der jeweiligen Höhenänderungszeitreihen in Tabelle 11 sind die Standardabweichung einer Ost-West-

Bewegungskomponente generell größer. Auf der anderen Seite sind Standardabweichungen einer Ost-West-Bewegung zwischen den zwei Kombinationen lediglich durch die Mittelwerte weniger voneinander zu unterscheiden.

Hierbei können auch die nach der Theorie berechneten Standardabweichungen für die kombinatativ berechnete Ost-West-Bewegungskomponente nach Formel (4-30) abgeleitet werden. Für die Berechnung der mittleren Standardabweichungen werden auch die mittleren Einfallswinkel angewendet.

Bei der kombinativen Berechnung mit RO-15 ($\bar{\theta}_{i,RO15} = 41,6^\circ$) und RO-37 ($\bar{\theta}_{i,RO37} = 31,5^\circ$):

$$s_{d_{O,(RO15\&RO37)}}^2 = 0,82 \cdot s_{LoS,RO15}^2 + 0,63 \cdot s_{LoS,RO37}^2 \quad (6-7)$$

Bei der kombinativen Berechnung mit RO-15 ($\bar{\theta}_{i,RO15} = 41,6^\circ$) und RO-139 ($\bar{\theta}_{i,RO139} = 40,0^\circ$):

$$s_{d_{O,(RO15\&RO139)}}^2 = 0,62 \cdot s_{LoS,RO15}^2 + 0,59 \cdot s_{LoS,RO139}^2 \quad (6-8)$$

Die ζ_O -Faktoren in den Gleichungen (6-7) und (6-8) geben für die Kombination mit RO-15 und RO-139 einen kleineren Quotienten, welche umgekehrt im Vergleich zur Höhenänderung ist. ζ_O -Faktoren sind generell größer als die jeweiligen ζ_Z -Faktoren, wodurch die Erhöhung der Standardabweichung einer Ost-West-Bewegungskomponenten gegenüber der entsprechenden Höhenänderung in Tabelle 11 und Tabelle 12 bestätigt wird.

Die Anhand der statistischen Betrachtung der ursprünglichen PSI-Ergebnisse in Kapitel 5.2.2 lassen sich dann die theoretischen Standardabweichungen einer kombinatativ berechneten Ost-West-Bewegungskomponente der beiden Kombinationen jeweils wie folgt ausrechnen:

$$s_{d_{O,(RO15\&RO37)}} = \sqrt{0,82 \cdot 3,4^2 + 0,63 \cdot 2,8^2} \approx 3,8 \text{ mm} \quad (6-9)$$

$$s_{d_{O,(RO15\&RO139)}} = \sqrt{0,62 \cdot 3,4^2 + 0,59 \cdot 3,3^2} \approx 3,7 \text{ mm} \quad (6-10)$$

Im Vergleich zu den in Tabelle 12 angegebenen mittleren Standardabweichungen sind die nach der Theorie berechneten ermittelten Werte jeweils leicht erhöht. Hierbei stimmen die nach der Theorie berechneten mittleren Standardabweichungen s_{d_O} mit der mittleren Standardabweichung s_0 statistischen Analyse über die kombinatativ berechneten Höhenänderungen tendenziell nicht überein, wobei der Unterschied zwischen den mittleren Standardabweichungen, sowohl bei der theoretischen Ermittlung als auch bei der polynombasierten statistischen Analyse der tatsächlichen gitterbasierten Zeitreihen, nur bei 0,1 – 0,2 mm liegt. Die kleine Differenz von 0,1 mm zwischen den beiden theoretischen mittleren Standardabweichungen indiziert, dass der durch die Konstellation verschaffte Vorteil der Kombination „RO-15 und RO-139“ durch die Zusammenwirkung der

ζ_0 -Faktoren und der Qualität der PSI-Zeitreihen reduziert wurde. Die Aussage lässt sich bei diesem geringfügigen Unterschied zwischen den theoretischen und tatsächlichen Mitten der statistischen Unsicherheiten treffen, dass der Qualitätsunterschied der kombinativ berechneten Ost-West-Bewegungen mittels dieser zwei Konstellationskombinationen für das ganze Ergebnis auch geringfügig sein wird und nicht eindeutig voneinander abzugrenzen ist.

Wenn die zu ermittelnden Ost-West-Bewegungskomponente eine mittlere Standardabweichung unterhalb 2 mm erreichen sollte, ausgegangen von einer identischen statistischen Qualität der PSI-Zeitreihen, müssen bei der kombinativen Berechnung mit RO-15 und RO-139 die PSI-Ergebnisse jeweils auf eine mittlere Standardabweichung von unter 1,8 mm aufweisen, mit RO-15 und RO-37 dann 1,7 mm. Wenn eine mittlere Qualität der PSI-Ergebnisse auf einem bestimmten Niveau von 3 mm liegen würde, könnte die potentielle mittlere Standardabweichung für die Kombination von RO-15 und RO-37 mit kleiner als 3,6 mm geschätzt werden. Dieses Potential könnte bei denselben Bedingungen für die Kombination von RO-15 und RO-139 mit kleiner als 3,3 mm geschätzt werden.

Abbildung 88 stellt die räumliche Verteilung der Standardabweichung der gitterbasierten Ost-West-Bewegungskomponente zwischen dem ersten und letzten Datum dar. Die Histogramme in Abbildung 89 zeigen die klassenbezogene Häufigkeitsverteilung dieser Standardabweichungen im Untersuchungsraum.

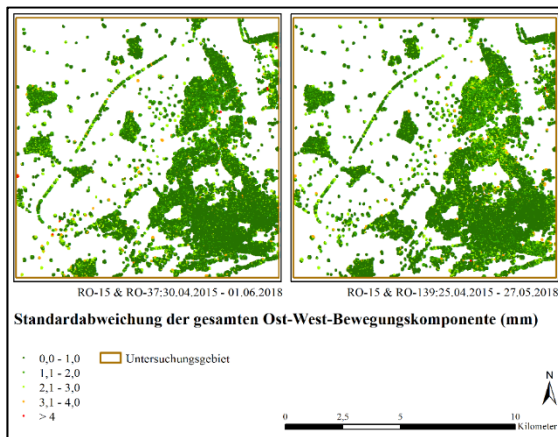


Abbildung 88: Räumliche Verteilung der Standardabweichungen der gesamten Ost-West-Bewegungskomponente (mm)

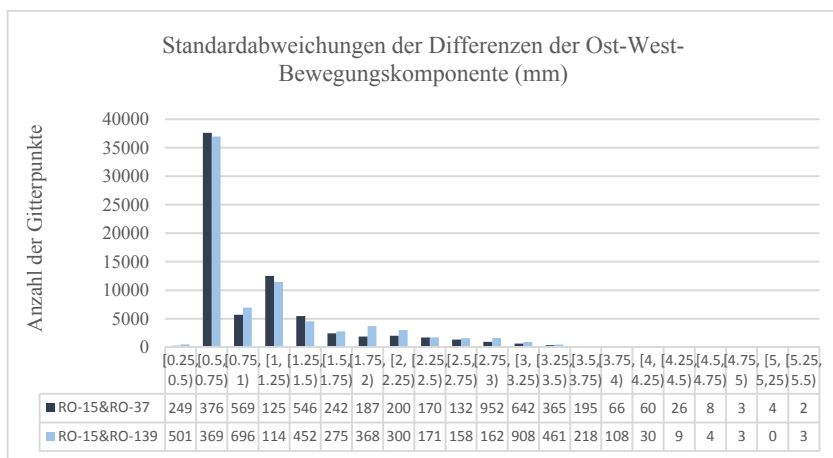


Abbildung 89: Standardabweichungen der Differenzen der Ost-West-Bewegungskomponente abgeleitet aus dem jeweils ersten und letzten Funktionswert der Trendfunktion einer Zeitreihe

Im Mittel ergibt sich für die Standardabweichungen der gesamten Ost-West-Bewegungskomponente der Kombination von RO-15 und RO-37 bzw. von RO-15 und RO-139 ein sehr ähnlicher Wert von jeweils 0,8 mm und 0,9 mm.

Die Anwendung dieses Signifikanztests auf alle Zeitreihen ergab, dass 7.989 Gitterpunkte (ca. 10,9 %) der Kombination von RO-15 und RO-37 nicht signifikante Höhenänderungsdifferenzen aufweisen, 9.883 Gitterpunkte (12,9 %) der Kombination von RO-15 und RO-139. In Abbildung 90 werden die signifikanten gesamten Ost-West-Bewegungskomponenten für den Zeitraum 04/2015 – 05/2018 dargestellt. Dabei ist ebenfalls keine markante Veränderung gegenüber der in Abbildung 69 dargestellten Ost-West-Bewegungskomponente zu erkennen.

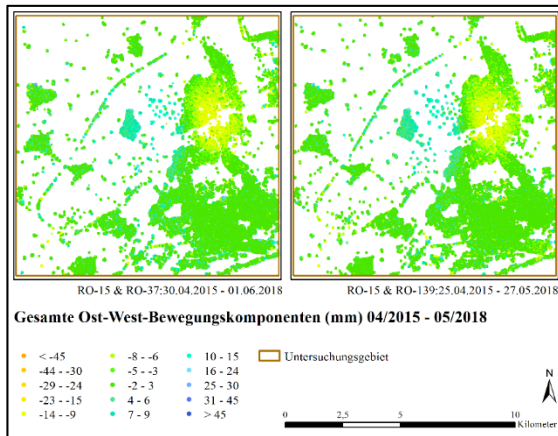


Abbildung 90: Mittels der Trendpolynomfunktion abgeleitete, signifikante gesamte Ost-West-Bewegungskomponente im Zeitraum 04/2015 – 05/2018 aus den kombinatorischen Berechnungen

Zudem kann durch die Standardabweichung der Differenzen von Ost-West-Komponenten näherungsweise größenordnungsmäßig die mindeste gesamte Ost-West-Bewegungskomponente für den Zeitraum 04/2015 – 05/2018 geschätzt werden, die als signifikant bezeichnet werden könnte. Geht man von den oben genannten, größeren Standardabweichungen von 0,8 mm für die beiden kombinatorischen Berechnungen aus, müsste eine so ermittelte „signifikante“ gesamte Ost-West-Bewegungskomponente unter Berücksichtigung einer Signifikanzschwelle von 99 % größer als ca. 2,1 mm sein.

6.2 Abschätzung der systematischen Abweichungen mittels der ortsabhängigen ε -Faktoren

Im Hinblick auf die Abschätzung der systematischen Abweichungen gilt es zunächst die in Kapitel 4 eingeführten ε -Faktoren für das Fallbeispiel zu bestimmen. Bereits im Vorfeld einer Auswertung kann diese Größe abgeleitet werden und somit liefert der ε -Faktor eine frühzeitige Abschätzungsmöglichkeit über die Größenordnung der systematischen Abweichungen. Auf Basis der Formeln (4-19) und (4-20) aus Kapitel 4.3.2 sind für die Berechnung der ε -Faktoren lediglich die Einfallswinkel und Azimute der Blickrichtungen erforderlich. Daher erfolgt der erste Schritt der Abschätzung der systematischen Abweichungen durch die Berechnung der konstellationsbedingten ε -Faktoren mithilfe der bekannten konstellationsbedingten Winkel (siehe Kapitel 5.1.3).

Die daraus resultierenden ε -Faktoren für die mittels sich kreuzender Tracks kombinativ berechneten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen sind an jedem Gitterpunkt in Abbildung 91 dargestellt.

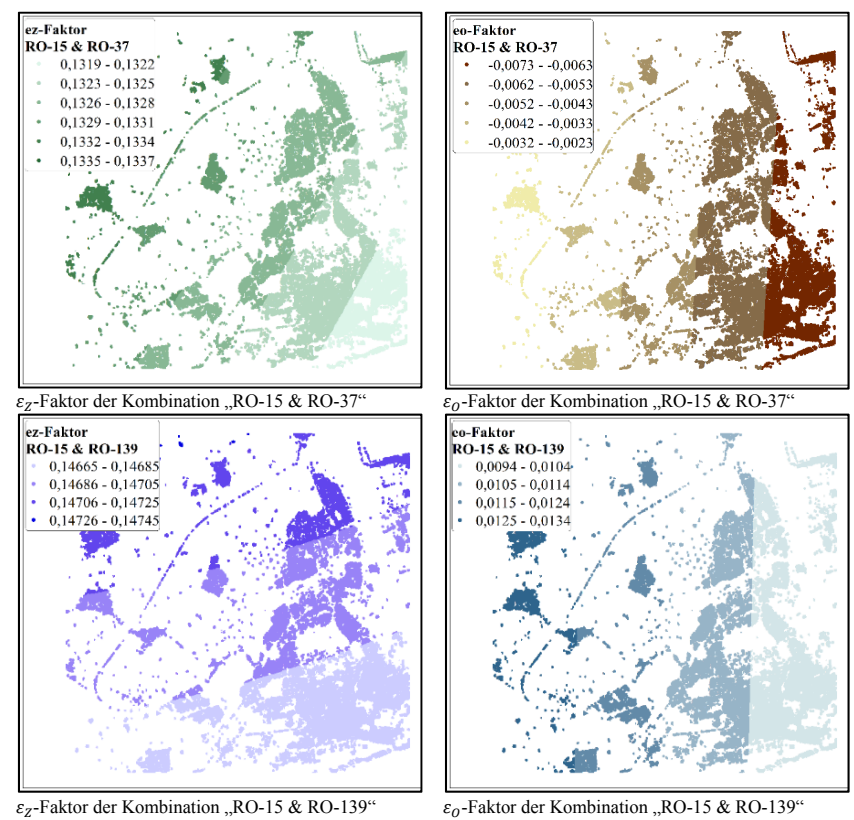


Abbildung 91: ε -Faktoren der verschiedenen Konstellationskombinationen

In Tabelle 13 sind die Wertbereiche der ε -Faktoren zusätzlich aufgelistet.

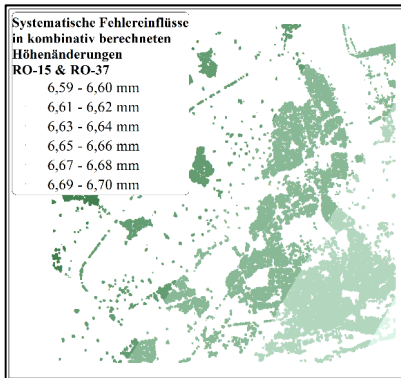
Tabelle 13: ε -Faktoren der verschiedenen Konstellationskombinationen

| | RO-15 & RO-37 | RO-15 & RO-139 |
|---------------------------|-------------------|-----------------|
| ε_z -Faktoren | 0,1319 ~ 0,1337 | 0,1467 ~ 0,1473 |
| ε_o -Faktoren | -0,0024 ~ -0,0073 | 0,0094 ~ 0,0134 |

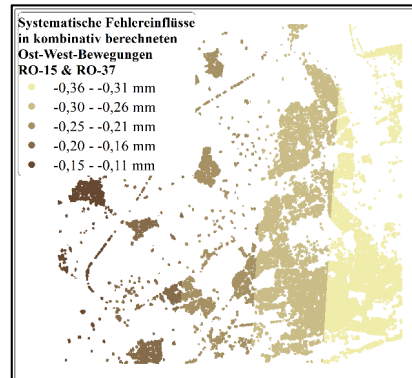
Der ε_Z -Faktor der Kombination „RO-15 & RO-139“ ist größer als der von „RO-15 & RO-37“, mit Beträgen von ca. 0,15 zu 0,13. Im Vergleich zu den ε_Z -Faktoren besitzen die jeweiligen ε_O -Faktoren höchstens nur ein Zehntel der Beträge mit kleiner als 0,01. Im Gegensatz zum ε_O -Faktor von „RO-15 & RO-139“ weist der ε_O -Faktor von „RO-15 & RO37“ ein negatives Vorzeichen und den kleinsten Betrag aller ε -Faktoren auf.

Im Hinblick auf die Abschätzung der systematischen Abweichungen spielen deren Größenordnung und Variation im Raum entscheidende Rollen. Die Größenordnung in Tabelle 13 zeigt, dass die Beträge mit 0,13 und 0,15 (ε_Z -Faktoren), bzw. 0,007 und 0,013 (ε_O -Faktoren) sehr klein sind. Dies bedeutet, dass an einem Ort mit einer angenommenen Nord-Süd-Bewegung von 50 mm, für einen bestimmten Zeitraum, die systematische Abweichung in der kombinatativ berechneten Höhenänderung 6,5 mm bzw. 7 mm beträgt, und in der Ost-West-Bewegung 0,35 mm bzw. 0,65 mm.

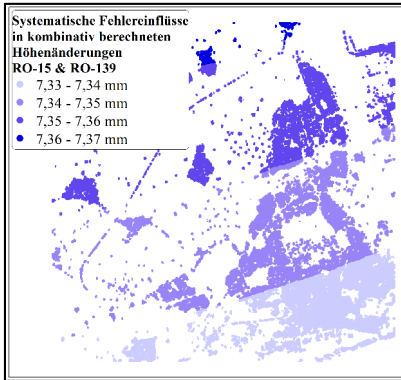
Um die mit den ε -Faktoren verbundenen systematischen Abweichungen räumlich in einer praxisnahen Größenordnung darzustellen, werden die mit einem angenommenen Wert der Nord-Süd-Bewegung von 50 mm berechneten systematischen Abweichungen in Abbildung 92 ersichtlich.



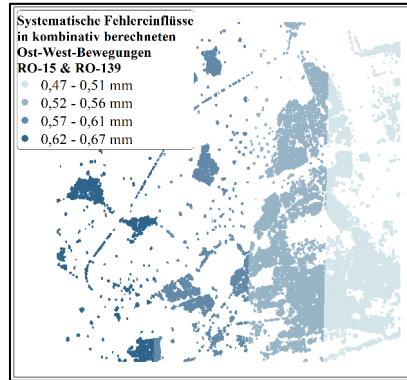
ε_Z -Faktor der Kombination „RO-15 & RO-37“



ε_O -Faktor der Kombination „RO-15 & RO-37“



ε_Z -Faktor der Kombination „RO-15 & RO-139“



ε_O -Faktor der Kombination „RO-15 & RO-139“

Abbildung 92: Größenordnungen (mm) der systematischen Abweichungen in kombinativ berechneten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen der verschiedenen Kombinationen, bei einer stetigen Nord-Süd-Bewegung von 50 mm über das Untersuchungsgebiet, für einen bestimmten Zeitraum

Als Konsequenz einer systematischen Abweichung in der Höhenänderung mit einer Größenordnung von 1,0 mm muss eine tatsächliche Nord-Süd-Bewegung daher 7,7 mm („RO-15 & RO-37“), bzw. 6,7 mm („RO-15 & RO-139“) betragen. In Bezug auf die Ost-West-Bewegung muss die Nord-Süd-Bewegung folglich 142,9 mm („RO-15 & RO-37“) und 76,9 mm aufweisen, um eine systematische Abweichung von 1 mm hervorzurufen.

Aus den Darstellungen in Abbildung 91 ist ersichtlich, dass die räumlichen Verteilungen der ε -Faktoren lineare Verläufe aufweisen. Die ε_Z -Faktoren nehmen bei den beiden Kombinationen grundsätzlich nach Südosten hin ab, speziell bei der Kombination „RO-15 & RO-139“ ist dieser Gradient mehr in Richtung Süden orientiert. Die Gradienten der ε_O -Faktoren orientieren sich in beiden Fällen in der Ost-West-Richtung, wobei sie umgekehrte Vorzeichen besitzen. Für die Betrachtung der Unterschiede spielt der Betrag des ε_O -Faktors eine wichtige Rolle, denn er nimmt bei der Kombination „RO-15 & RO-139“ nach Osten ab, während dies bei der Kombination „RO-15 & RO-37“ nach Westen der Fall ist.

Betrachtet man die ε_Z -Faktoren einer Kombination, so unterscheiden sie sich im Untersuchungsgebiet erst ab der Stelle des Tausendstels, und zwar innerhalb der Wertspannen von 0,0018 („RO-15 & RO-139“) und sogar nur 0,0006 („RO-15 & RO-37“). Ebenfalls unterscheiden sich die ε_O -Faktoren jeweils maximal mit den Differenzen von 0,0049 („RO-15 & RO-37“) und 0,0040 („RO-15 & RO-139“). Diese Werte deuten darauf hin, dass die ε -Faktoren der jeweiligen ermittelten Bewegungskomponenten aus den verschiedenen Kombinationen innerhalb des Untersuchungsgebietes nur geringe Variationen aufweisen.

Aufgrund der obengenannten räumlichen Variationen der ε -Faktoren, bei derselben Nord-Süd-Bewegung (z. B. 50 mm) im Untersuchungsgebiet, ergeben sich Differenzen der systematischen Abweichungen von maximal 0,09 mm („RO-15 & RO-139“) und 0,03 mm („RO-15 & RO-37“) in der Höhenänderung, während diese maximalen Differenzen in der Ost-West-Bewegung 0,2 mm („RO-15 & RO-139“) und 0,25 mm („RO-15 & RO-37“) betragen. Dies deutet darauf hin, dass die Variation von ε -Faktoren, trotz eines großzügig ausgewählten Nord-Süd-Bewegungsbetrags, keinen nennenswerten ortsabhängigen Unterschied an systematischen Abweichungen auslöst, wenn die Ausdehnung eines Bewegungsgebietes lokal begrenzt ist, z. B. wie im gegebenen Fallbeispiel mit ca. 6 km x 6 km. Damit wird die Ortsabhängigkeit der systematischen Abweichung überwiegend durch die bekannte, tatsächliche Nord-Süd-Bewegung bedingt.

Bemerkenswert sind hierbei auch die Wertebereiche der systematischen Abweichung in der Ost-West-Bewegung. Bei einer Nord-Süd-Bewegung von 50 mm werden für das Fallbeispiel maximal die systematische Abweichung von 0,35 mm bzw. 0,65 mm ausgelöst. Wegen der Variation der ε_0 -Faktoren können diese Werte noch auf 0,15 mm bzw. 0,4 mm verkleinert werden, was für die Beträge der Abweichung in sich eine signifikante Veränderung ist. Jedoch bleiben die Beträge der systematischen Abweichung ohnehin weit unter 1 mm, wenn die tatsächliche Nord-Süd-Bewegung, wie auch in der Realität, kleiner als 50 mm wäre. Bezüglich der bereits in Kapitel 5.4.1 angegebenen Signifikanzgrenze der Bewegungskomponenten in einem bestimmten Zeitraum sind die systematischen Abweichungen in der kombinativ berechneten Ost-West-Bewegungskomponente unter den ε_0 -Faktoren des Fallbeispiels nicht signifikant.

Diese ermittelten ε -Faktoren können vorab zur Abschätzung und somit durch eine verbesserte Konstellationsauswahl zur Reduktion der systematischen Abweichungen beitragen. Ein kleinerer ε -Faktor, im Sinne des Betrags, führt folglich bei derselben Situation der Nord-Süd-Bewegung im Vergleich zu einem größeren ε -Faktor auch zu einer geringeren systematischen Abweichung. Stehen mehrere Kombinationen von Konstellationen zur Verfügung, sind somit grundsätzlich die Kombination mit kleinerem Betrag der ε -Faktoren zu empfehlen, um kleinere systematische Abweichungen zu erzielen.

In Kapitel 4.3.2.1 wurden bereits die allgemeinen Empfehlungen zur Datenauswahl formuliert. Um basierend auf der Datenauswahl den minimalen ε_Z -Faktor zu erhalten, sollte die Auswahl der Kombination über einen möglichst steilen Einfallswinkel und möglichst in Ost-West-Richtung orientierte Azimute der Blickrichtungen für die beiden Aufnahmerichtungen verfügen, ohne die genauen Werte der ε -Faktoren berechnen zu müssen. Durch die im Fallbeispiel ermittel-

ten Ergebnisse lässt sich diese grundlegende Auswahl bestätigen. Hierbei dominiert der Einfluss des steileren Einfallswinkels von RO-37 (etwa 9° steiler als der Einfallswinkel von RO-139), obwohl das Azimut der Blickrichtung von RO-37 knapp 2° nach Norden geneigt ist und somit ungünstiger in Bezug auf die genannten Kriterien erscheint. Um einen kleineren ε_O -Faktor aus mehreren verfügbaren Konstellationskombinationen zu erhalten, ist wie in Kapitel 4.3.2.1 dargestellt, die genaue Berechnung erforderlich. Hierbei besitzt die Kombination „RO-15 & RO-37“ die größeren Differenzen der Einfallswinkel ($\Delta\theta \approx +10^\circ$) und Azimute der Blickrichtungen ($\Delta\alpha \approx +3^\circ$) im Vergleich zu den Differenzen ($\Delta\theta \approx +1^\circ$, $\Delta\alpha \approx +2^\circ$) bei der Kombination „RO-15 & RO-139“. Da die beiden Winkeldifferenzen jeder Kombination gleiche Vorzeichen besitzen wirken sie sich destruktiv interferierend auf den ε_O -Faktor aus. Hierbei können die Auswirkungen der Winkeldifferenzen bei der Kombination „RO-15 & RO-37“ sich gegenseitig fast auslöschen, wodurch der kleinere ε_O -Faktor entstanden ist. Abschließend ist festzuhalten, dass die berechneten ε -Faktoren durch die Simulation erwartete Größenordnungen annehmen und somit als plausibel bewertet werden können.

6.3 Abschätzung der systematischen Abweichungen mittels der Nord-Süd-Bewegungskomponente basierend auf geometrischen Annahmen

Im Zuge der Abschätzung und Berechnung der Bewegungskomponenten und deren jeweiliger systematischen Abweichungen sind die Nord-Süd-Bewegungen noch ausstehend. Wie in Kapitel 4 bereits erläutert wurde, sind die dreidimensionalen Bodenbewegungskomponenten nach der Definition in Kapitel 2.1 unter Nutzung von einer oder zwei sich linear unabhängigen Aufnahmegeometrien nicht vollständig lösbar. Bei der kombinatorischen Berechnung mit zwei sich kreuzenden Tracks können jedoch zwei Bewegungskomponenten (Höhenänderung und Ost-West-Bewegungskomponente) bereits ermittelt werden. Um die fehlende dritte Bewegungskomponente in Nord-Süd-Richtung zu erhalten, müssen nur die Azimute der Horizontalbewegungen $\alpha_{\vec{d}}$ bekannt sein. Es gilt dann die Formel (6-11) für die Berechnung der Nord-Süd-Bewegung.

$$\begin{aligned} \tan \alpha_{\vec{d}} &= \frac{d_O}{d_N} \\ d_N &= \frac{d_O}{\tan \alpha_{\vec{d}}} \end{aligned} \tag{6-11}$$

Daher wird in diesem Kapitel dieser Ansatz zur Berechnung der Nord-Süd-Bewegungskomponente basierend auf der Ermittlung der Azimute der Horizontalbewegungen an jedem Punkt verfolgt. Somit stellen zusammengefasst die Ost-West-Bewegungskomponente und die Azimute der Horizontalbewegungen die erforderlichen Eingangsgrößen dar.

Als vorheriges Ergebnis wurde die Ost-West-Bewegungskomponente bereits ermittelt, wobei darin noch die systematischen Abweichungen enthalten sind. Um die kombinatorisch berechneten Ost-West-Bewegungskomponente als die Eingangsgröße für die Abschätzung der Nord-Süd-Bewegungskomponente zu verwenden, ist es zunächst nachzuweisen, ob die Beträge der systematischen Abweichung auf die Ost-West-Bewegungskomponente für das Fallbeispiel signifikant sind.

Letztlich benötigt die Ableitung der Azimute der Horizontalbewegungen eine grundlegende Modellvorstellung, welche sich zur Ermittlung der Azimute lediglich die bisher bekannten Größen zu nutzen macht. Für dieses Fallbeispiel sind die Ost-West-Bewegung, die Höhenänderung und deren gitterpunktbezogene Ortslage bekannt. Da keine zusätzlichen Informationen (zu Geologie und anthropogenen Einflüssen, etc.) zur Verfügung stehen und somit der Aufbau eines realitätsnahen geomechanischen Bodenbewegungsmodells nicht durchführbar ist, wird hierbei eine Modellvorstellung bezogen auf den geometrischen Eigenschaften der Senkungsmulde aufgestellt, wodurch eine Verbindung zwischen dem Azimut der Horizontalbewegung und der Ortslage jedes Gitterpunktes hergestellt wird.

6.3.1 Charakteristiken der grundlegenden Modellvorstellung

Die in Kapitel 5 errechneten Bewegungskomponenten aus der kombinatorischen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks zeigen eine typische Senkungsmulde (vgl. Abbildung 76), bei der ein kreisförmiger Senkungstrog gebildet wird, und die Horizontalbewegungen zur Senkungsmulde zeigen. Betrachtet man die Bereiche mit einer jährlichen Senkung von größer als 6 mm, welche den gelborangen Gebieten in Abbildung 72 bei den kombinatorisch berechneten jährlichen Höhenänderungen ab 2016 entsprechen, als die Senkungsmulde, lässt sich im Fallbeispiel nur eine Senkungsmulde erkennen. Diese Senkungsmulde zeigt ab 2016 eine eindeutige räumliche Abgrenzung zu den darum liegenden Gebieten mit geringeren Senkungen und lässt bei beiden Kombinationen keine Lagerveränderung erkennen.

Solch eine typische Senkungsmulde, welche auch der Simulation in Abbildung 27 entspricht, kann zu folgender Modellvorstellung einer Senkungsmulde mit einem Kerngebiet führen:

1. Die Horizontalbewegungen an jedem Ort innerhalb eines Senkungsgebietes zeigen zur Senkungsmitte.
2. Auf der längsten Ost-West-Achse, die durch die Senkungsmitte geht, erreicht der Betrag der Ost-West-Bewegung ihr Maximum. Dort tritt keine Nord-Süd-Bewegung auf. Ebenfalls erreicht die Nord-Süd-Bewegungskomponente auf der längsten, durch die Senkungsmitte gehenden Achse ihren maximalen Betrag.
3. Die Beträge der Horizontalbewegungen auf derselben Linie gleicher Höhenänderung sind identisch.
4. Entlang der Ost-West- sowie Nord-Süd-Profilspuren, die der Tangente einer Linie gleicher Höhenänderung entsprechen, entsprechen die Schnittpunkte dem Senkungsmaximum jedes Profils (Abbildung 93). Die zwei Linien, auf denen sich jeweils solche Schnittpunkte der Ost-West-Profile (rote Punkte in Abbildung 93) und der Nord-Süd-Profile (gelbe Punkte in Abbildung 93) befinden, schneiden sich miteinander in der Senkungsmitte.

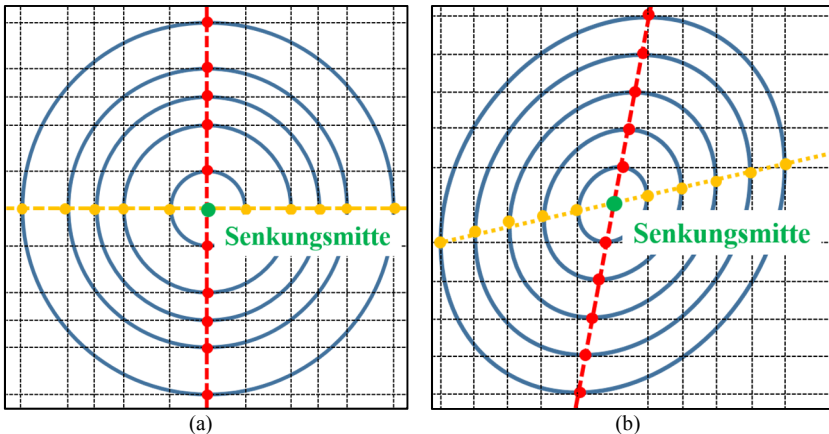


Abbildung 93: Vereinfachte Modellvorstellung zur Findung der Senkungsmitte

6.3.2 Abschätzung der maximalen systematischen Abweichungen des Fallbeispiels

Mittels der zweiten und dritten Annahme der Modellvorstellung gilt die folgende Beziehung für die Horizontalbewegung und die zwei horizontalen Bewegungskomponenten auf derselben Linie gleicher Höhenänderung $d_z = i$:

$$\|d_{Hor, d_z=i}\| = \sqrt{d_{O, d_z=i}^2 + d_{N, d_z=i}^2} = \max_{d_z=i} d_O = \max_{d_z=i} d_N \quad (6-12)$$

Die Koordinaten der maximalen Ost-West-Bewegungskomponente $\max_{d_z=i} d_o$ und Nord-Süd-Bewegungskomponente lassen sich durch die Schnittpunkte zwischen der Höhenänderungs isolinie $d_z = i$ und der längsten Ost-West- bzw. Nord-Süd-Achse ermitteln.

Aus Abbildung 79 kann der maximale Betrag für die gesamte Ost-West-Bewegungskomponente von ca. 13 mm entnommen werden; gleiches gilt für den Betrag der Höhenänderung mit ca. 17 mm. Somit kann der Betrag der maximalen systematischen Abweichung in der Ost-West-Bewegungskomponente auf der Nord-Süd-Achse der Senkungsmulde mit $13 \text{ mm} \times 0,005 = 0,065 \text{ mm}$ für die Kombination „RO-15 & RO-37“ abgeschätzt werden. Dieser beträgt bei „RO-15 & RO-139“ $13 \text{ mm} \times 0,01 = 0,13 \text{ mm}$. Die größte systematische Abweichung in der Ost-West-Bewegungskomponente befindet sich auf der Nord-Süd-Achse der Senkungsmulde, d. h. in der Umgebung der tatsächlichen Nulllinien der Ost-West-Bewegungskomponente. Eine solche Abweichung wird den Betrag der Ost-West-Bewegungskomponente, welcher in der Realität Null sein sollte, auf 0,065 mm bzw. 0,13 mm erhöhen. In Kapitel 6.1.2 wurde bereits ermittelt, dass die durchschnittliche signifikante Ost-West-Bewegung für den gesamten Untersuchungszeitraum 2,1 mm bei beiden Kombinationen beträgt. Somit lässt sich die Aussage treffen, dass die größte, annahmebedingte systematische Abweichung auf der Ost-West-Bewegungskomponente keine signifikante Wertänderung in die ermittelte Ost-West-Bewegungskomponente erzeugt.

An derselben Stelle kann der Betrag der systematischen Abweichung in der kombinativ berechneten Höhenänderung mit $13 \text{ mm} \times 0,133 = 1,73 \text{ mm}$ für die Kombination „RO-15 & RO-37“ abgeschätzt werden. Dieser ist im Falle „RO-15 & RO-139“ $13 \text{ mm} \times 0,147 = 1,91 \text{ mm}$. Diese Werte sind knapp über der durchschnittlichen signifikanten Höhenänderung für den gesamten Untersuchungszeitraum, und entsprechen bei der Kombination „RO-15 & RO-37“ und „RO-15 & RO-139“ jeweils etwa 10 % und 11 % der kombinativ berechneten Höhenänderung.

6.3.3 Ermittlung der Nord-Süd-Bewegungskomponente mittels der grundlegenden Modellvorstellung

Die im vorangegangenen Kapitel abgeschätzten systematischen Abweichungen in den jeweiligen Bewegungskomponenten stellen das zu erwartende Maximum im Untersuchungsgebiet dar. Bislang sind dieser Abweichung keiner Ortslage zugewiesen. Für bestimmte Anwendungsfälle können diese Extrema bereits zur Beurteilung dienen, ob die systematischen Abweichungen im Hinblick auf die

Größenordnung der kombinatv berechneten Bewegungskomponenten relevant sind. In Bezug auf die ortsabhängige Nord-Süd-Bewegungskomponente sind die resultierenden systematischen Abweichungen, wie bereits erwähnt, von Gitterpunkt zu Gitterpunkt unterschiedlich. Um die Ortsabhängigkeit der systematischen Abweichungen herzustellen wird ein Ansatz entwickelt, damit die gitterpunktbezogene Nord-Süd-Bewegung abgeleitet werden kann.

Neben der Ost-West-Bewegung ist die zweite erforderliche Eingangsgröße zur Ermittlung der Nord-Süd-Bewegungskomponente das Azimut der Horizontalbewegung. Dieser lässt sich mithilfe der ersten Annahme der obengenannten Modellvorstellung, dass die Horizontalbewegungen an jedem Ort innerhalb eines Senkungsgebietes zur Senkungsmittle zeigen, und der zeitabhängigen Koordinaten der Senkungsmittle $P_{\max d_Z}(O_{\max d_Z}(t), N_{\max d_Z}(t))$ an jedem Ort $P(O, N)$ innerhalb eines Senkungsgebietes ermitteln:

$$\tan \alpha_{\bar{d}}(O, N, t) = \frac{O - O_{\max d_Z}(t)}{N - N_{\max d_Z}(t)} \quad (6-13)$$

Formel (6-13) beschreibt die allgemeine Ermittlungsmethodik für das ortsabhängige Azimut der Horizontalbewegung bei einem Senkungsgebiet mit einer einzigen Senkungsmittle. Dabei wird auch die Lageveränderung der Senkungsmittle mit der Zeit berücksichtigt. Obliegt eine Senkungsmittle für einen bestimmten Zeitraum keiner Lageveränderung, wie im gesamten Untersuchungszeitraum des Fallbeispiels beobachtet (vgl. Kapitel 5.4.1), lässt sich Formel (6-13) zu Formel (6-14) vereinfachen.

$$\tan \alpha_{\bar{d}}(O, N) = \frac{O - O_{\max d_Z}}{N - N_{\max d_Z}} \quad (6-14)$$

Werden die Formeln (6-11) und (6-14) zusammengefügt, kann die Nord-Süd-Bewegungskomponente an jedem Ort $P(O, N)$ innerhalb eines Senkungsgebietes mittels der folgenden Formel (6-15) berechnet werden.

$$d_N(O, N) = \frac{d_O(O, N)}{\tan \alpha_{\bar{d}}(O, N)} = \frac{d_O(O, N)}{O - O_{\max d_Z}} \cdot (N - N_{\max d_Z}) \quad (6-15)$$

Die Suche nach der Nord-Süd-Bewegungskomponente kann im Sinne der Formel (6-15) als die Suche nach den Koordinaten der Senkungsmittle $P_{\max d_Z}(O_{\max d_Z}, N_{\max d_Z})$ betrachtet werden.

Mithilfe der vierten Annahme der Modellvorstellung können die Koordinaten der Senkungsmittle durch die Bestimmung vom Schnittpunkt der zwei aus den profilsmaximalen Senkungen bestehenden Linien (vgl. Abbildung 93) bestimmt werden. Da die Simulation in Kapitel 4.3.2 zeigt, dass das Senkungsmaximum der kombinatv berechneten Senkungsmulle entlang der Ost-West-Profile keine

Lageverschiebung und entlang der Nord-Süd-Profile nur wenig Lageverschiebung aufweist, kann die Ermittlung der Senkungsmitte anhand der kombinativ berechneten Höhenänderungen realisiert werden.

In Kapitel 5.4.3 wurden bereits Profilsuren in der Nord-Süd- und der Ost-West-Richtung angelegt. Diese Profilsuren wurden als die längsten Achsen der Senkungsmulde in der Nord-Süd- und der Ost-West-Richtung angenommen. Um die Koordinaten der Senkungsmitte sicher zu definieren sind weitere Profilsuren zu ergänzen. Um die bereits erstellten Nord-Süd- und Ost-West-Profile wurden zusätzlich jeweils Nord-Süd- und Ost-West-Profilsuren mit dem Abstand von 100 m über das Senkungsgebiet angelegt (Abbildung 94).

Hierbei wird das Senkungsgebiet bezüglich der in Kapitel 5.4.2 abgeleiteten 2 mm - Isolinien von den Gesamthöhenänderungen, und der ± 2 mm - Isolinien von den gesamten Ost-West-Bewegungen, welche der Signifikanzgrenze der beiden Bewegungskomponenten für den gesamten Untersuchungszeitraum entsprechen, auf eine Fläche von 6100 m x 5760 m eingeschränkt. Diese Begrenzung ist in Abbildung 94 mit dem roten Rahmen dargestellt. Dadurch sollten mögliche Einflüsse anderer Bewegungsquellen, die sich in der räumlichen Nähe des zu untersuchenden Senkungsgebiets befinden, ausgeschlossen werden. Für dieses oben definierte Senkungsgebiet wird ein lokales Koordinatensystem verwendet, bei dem der unten-linker Eckpunkt des roten Rahms als das Origin definiert wird und die X- und Y-Achsen jeweils den Ost-West- und Nord-Süd-Achsen entsprechen.

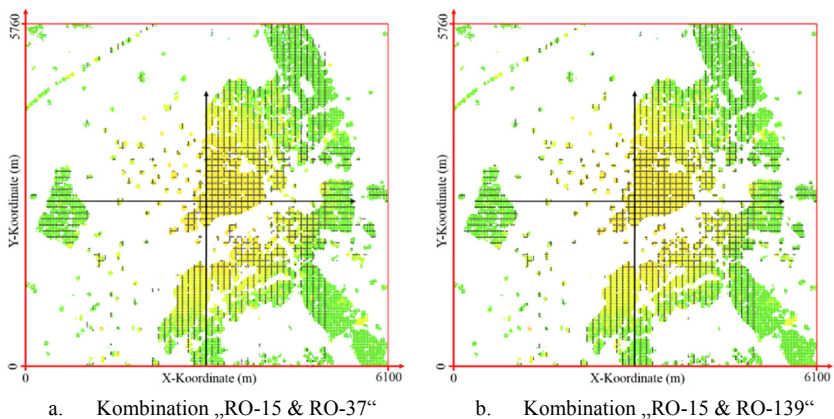


Abbildung 94: Profilsuren zur Identifikation der Senkungsmitte (schwarze Linien), mit der Gesamthöhenänderung der Gitterpunkte von der Kombination „RO-15 & RO-37“ als Hintergrund

Entlang solcher Profilsuren wird die aus den Funktionswerten ermittelte gesamte Höhenänderung der Gitterpunkte in den Abstands-Gesamthöhenänderungs-Diagrammen dargestellt. Die Gesamthöhenänderung, im Gegensatz zu kürzeren Zeiträumen, kann die vollständige Geometrie der Senkungsmulde in seiner eindeutigsten Form erfassen. Durch den dabei verwendeten gesamten Zeitraum ist in den Profilen das jeweilige Senkungsmaximum ebenfalls am eindeutigsten.

Auf diesen Profilen sind jeweils die Koordinaten des Senkungsmaximums zu ermitteln, wodurch die zwei in Abbildung 93 schematisch dargestellten Linien der Senkungsmaxima rekonstruiert werden können. Wegen der ungleichmäßigen Verteilung der Gitterpunkte entlang der Profile und der verrauschten Gesamthöhenänderungen im räumlichen Kontext, muss hierbei die Trendlinie jedes Profils abgeschätzt werden. Mithilfe der Trendlinienfunktion kann das Senkungsmaximum (Minimum der Trendlinie) mathematisch gelöst werden.

Zur Abschätzung der Trendlinie wird die Polynomausgleichung mittels der Methode der kleinsten Quadrate⁹ eingesetzt. Es wird manuell für jedes Profil erfahrungsgemäß passende Polynomgrade getestet und festgelegt. Da die Geometrie einer Senkungsmulde normalerweise einem Polynom 4. Grades entsprechen könnte, werden die manuellen Tests für die Polynomanpassung mit dem 4. Polynomgrad begonnen. Bei verrauschten Fällen werden auch andere Polynomgrade verwendet. Hierfür sollte ein Polynomgrad über 8 grundsätzlich nicht verwendet werden, weil die Trendfunktion mit höheren Polynomgraden auch das Rauschen modelliert. Eine solche Trendfunktion ist für die weitere Berechnung nicht verwendbar. Das Minimum der abgeschätzten Polynomfunktion des Profils wird dann mittels des Downhill-Simplex-Verfahrens (Nelder & Mead, 1965) ermittelt¹⁰.

Geplant sollten westlich und östlich vom in Kapitel 5.4.3 analysierten Nord-Süd-Profil (durchgezogenen Profillinie mit dem Pfeil nach Norden in Abbildung 94) jeweils 20 Profile untersucht werden. In der Ost-West-Richtung werden nördlich und südlich des in Kapitel 5.4.3 analysierten Ost-West-Profils (durchgezogenen Profillinie mit dem Pfeil nach Osten in Abbildung 94) jeweils 10 Profile geplant.

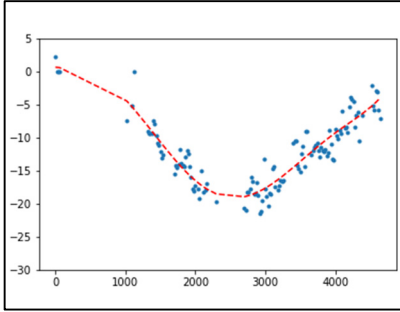
Jedoch umfassen nicht alle Profilsuren ausreichende Gitterpunkte, die sowohl in einer genügenden Anzahl als auch für eine angemessene Diskretisierung der Muldencharakteristik zur Verfügung stehen. Die Nord-Süd-Profilsuren mit jeweils weniger als 10 Gitterpunkten nördlich und südlich des in Kapitel 5.4.3 analysierten Ost-West-Profils werden nicht für die Abschätzung der Senkungsmitte

⁹ Python basierte Numpy-Klasse „polyfit“:
<https://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/generated/numpy.polyfit.html>

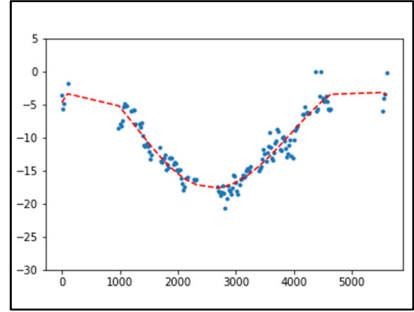
¹⁰ Python basierte Scipy-Klasse „optimize.fmin“:
<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.fmin.html#id1>

verwendet. Dieses Ausschlusskriterium gilt gleichfalls übertragen für die 20 geplanten Ost-West-Profilspuren.

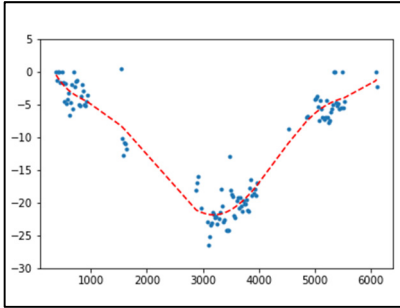
Beispielhaft sind vier der Abstands-Gesamthöhenänderungs-Diagramme der verwendeten Profilsuren in Abbildung 95 dargestellt. Mit den rot-gestrichelten Linien werden die Trendpolynomfunktionen der Profile gekennzeichnet.



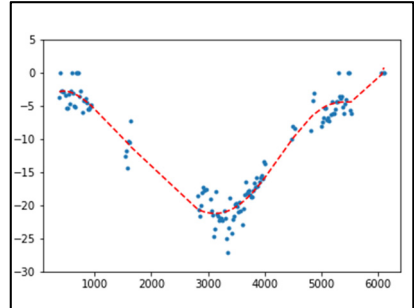
a. Süd-Nord-Profil, RO-15 & RO-37, X-Koordinate des Profils: 3.840 m, $u_{pf} = 7$, $s_{0,pf} = 1,96$ mm



b. Süd-Nord-Profil, RO-15 & RO-139, X-Koordinate des Profils: 3.840 m, $u_{pf} = 6$, $s_{0,pf} = 1,52$ mm



c. West-Ost-Profil, RO-15 & RO-37, Y-Koordinate des Profils: 2.780 m, $u_{pf} = 7$, $s_{0,pf} = 2,30$ mm



d. West-Ost-Profil, RO-15 & RO-139, Y-Koordinate des Profils: 2.780 m, $u_{pf} = 8$, $s_{0,pf} = 1,97$ mm

Abbildung 95: Höhenänderungsprofile mit den jeweiligen angepassten Polynomkurven

Um die Qualität der Anpassungen zu erfassen, werden die Standardabweichung eines Messwertes $s_{0,pf}$ mittels der Formel (6-16) nach Niemeier (2008) berechnet.

$$s_{0,pf} = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_{pf}^T \mathbf{v}_{pf}}{n_{pf} - u_{pf}}} \quad (6-16)$$

Dabei steht \mathbf{v}_{pf} für die Restverbesserungen entlang eines Profils; n_{pf} entspricht der Anzahl der ausgeglichenen Messwerte (Beobachtungen); u_{pf} ist die Anzahl der Unbekannten des Polynoms.

Die Histogramme, welche nach den Profilrichtungen und den Konstellationskombinationen klassifiziert sind, sind in Abbildung 96 ersichtlich.

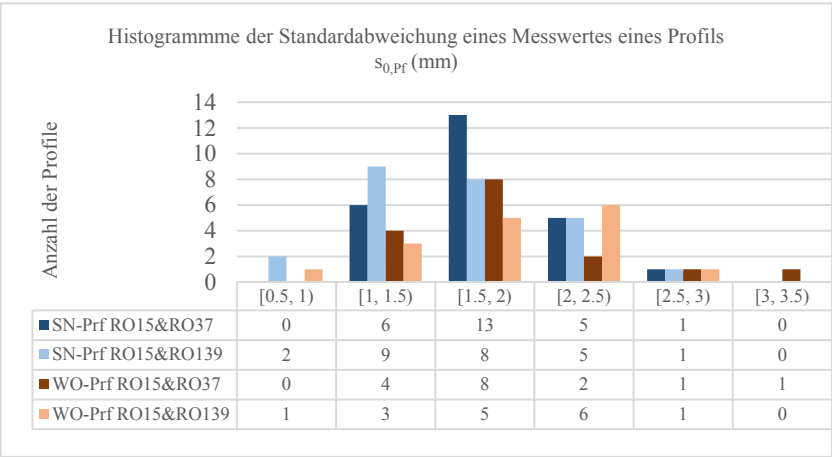
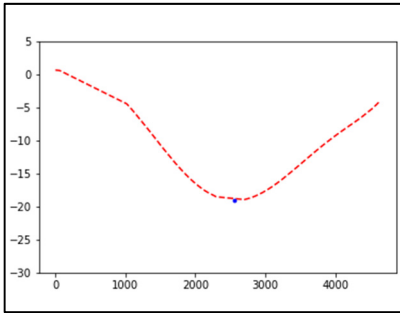


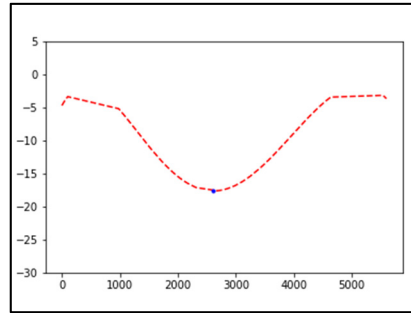
Abbildung 96 Standardabweichung eines Messwertes in einem Profil

Die Standardabweichungen $s_{0,Pf}$ der Polynomfunktionen schwanken hauptsächlich im Wertbereich von 1 mm bis 2,5 mm bei den Profilen aus allen vier dargestellten Konditionen. Gegenüber den jeweiligen West-Ost-Profilen (hellblaue und hellorange Säulen in Abbildung 96) weisen die Süd-Nord-Profile (dunkelblaue und dunkelorange Säulen in Abbildung 96) kleinere Standardabweichungen auf. Zudem zeigen die Süd-Nord-Profile der Kombination „RO-15 & RO-37“ die Standardabweichung mehr im Wertebereich von 1,5 mm bis 2 mm im Gegensatz zu den Süd-Nord-Profilen der Kombination „RO-15 & RO-139“, welche hauptsächlich in den zwei Klassen von 1 mm bis 2 mm auftreten. Dagegen zeigen die West-Ost-Profile der Kombination „RO-15 & RO-139“ die Standardabweichung mehr im Wertebereich von 2 mm bis 2,5 mm, welche damit größer als die West-Ost-Profile der Kombination „RO-15 & RO-37“ sind, die bei 1,5 mm bis 2 mm liegen.

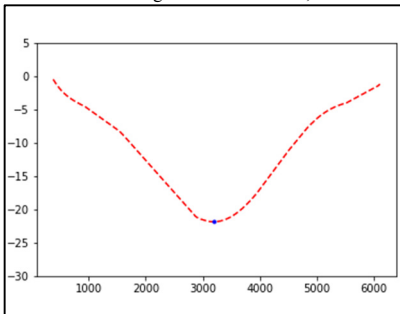
Die nach der obengenannten Methode ermittelten Senkungsmaxima für die in Abbildung 95 gezeigten Profile, sind in Abbildung 97 dargestellt. Anhand der ermittelten Senkungsmaxima der Süd-Nord-Profile werden eine Reihe von Y-Koordinaten der Senkungsmitten berechnet werden, während die West-Ost-Profile die Reihe von Rechtwerten liefern können.



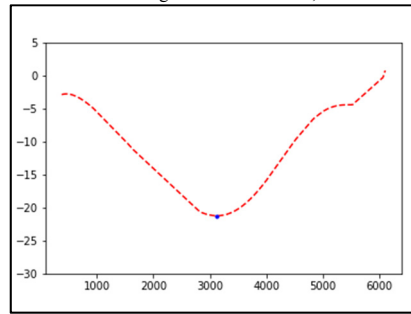
a. Süd-Nord-Profil, RO-15 & RO-37, X-Koordinate des Profils: 3.840 m, $u_{pf} = 7$, $s_{0,pf} = 1,96 \text{ mm}$, Y-Koordinate des Senkungsmaximums: **2.561,07 m**



b. Süd-Nord-Profil, RO-15 & RO-139, X-Koordinate des Profils: 3.840 m, $u_{pf} = 6$, $s_{0,pf} = 1,52 \text{ mm}$, Y-Koordinate des Senkungsmaximums: **2.611,86 m**



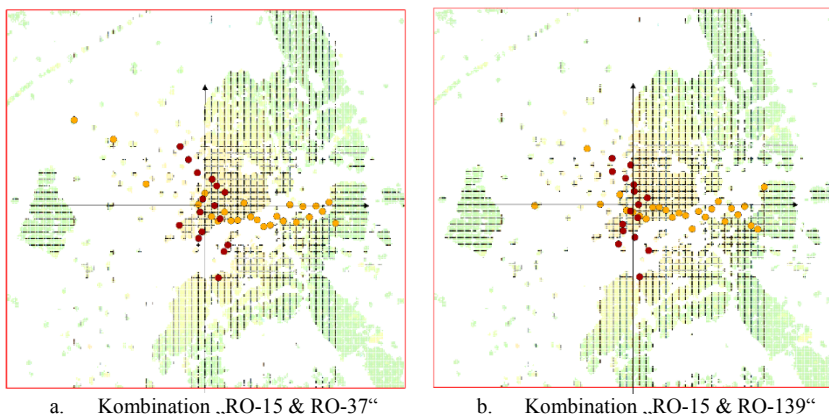
c. West-Ost-Profil, RO-15 & RO-37, Y-Koordinate des Profils: 2.780 m, $u_{pf} = 7$, $s_{0,pf} = 2,30 \text{ mm}$, X-Koordinate des Senkungsmaximums: **3.187,45 m**



d. West-Ost-Profil, RO-15 & RO-139, Y-Koordinate des Profils: 2.780 m, $u_{pf} = 8$, $s_{0,pf} = 1,97 \text{ mm}$, X-Koordinate des Senkungsmaximums: **3.122,76 m**

Abbildung 97: Polynomkurven der Höhenänderungsprofile mit dem ermittelten Senkungsmaximum

Durch die Analysen der gezeigten Süd-Nord-Profile der jeweiligen Kombinationen ergeben sich z. B. die Y-Koordinaten von 2.561,07 m (a) und 2.611,86 m (b) für die Senkungsmaxima entlang der beiden Profile. Die X-Koordinate der Senkungsmaxima entlang der jeweiligen gezeigten West-Ost-Profile sind z. B. 3.187,45 m (c) und 3.122,76 m (d). Die somit ermittelten Senkungsmaxima aller verwendeten Profile sind in Abbildung 98 zusammengefasst und dabei auf ihren zugehörigen Profilsuren dargestellt. Dabei werden die Senkungsmaxima der Süd-Nord-Profile in Gelb markiert, und die Senkungsmaxima der West-Ost-Profile in Rot.



a. Kombination „RO-15 & RO-37“
b. Kombination „RO-15 & RO-139“
Abbildung 98: Ermittelte Senkungsmaxima aus Süd-Nord- (gelb) und West-Ost-Profilspuren (rot)

Die aus Süd-Nord- und West-Ost-Profilen ermittelten Senkungsmaxima befinden sich jeweils grundsätzlich um die in Kapitel 5.4.3 analysierten Profilspuren, die als die längsten Achsen der Senkungsmulde in Nord-Süd- und Ost-West-Richtungen vermutet wurden. Zudem ist es bei den Senkungsmaxima der Süd-Nord-Profile zu erkennen, dass auf der östlichen Seite der Senkungsmulde mehr Profilspuren für die Ermittlung der Senkungsmaxima zur Verfügung stehen und die orangen Punkte quasi auf einer in der Ost-West-Richtung orientierten Linie liegen. Im Gegensatz dazu konnten aufgrund der geringen Gitterpunktdichte nur 3 bis 4 Süd-Nord-Profile auf der westlichen Seite der Senkungsmulde analysiert werden. Aus diesen Profilen bei der Kombination „RO-15 & RO-37“, wurden die Y-Koordinaten der Senkungsmaxima mit größerer Abweichung (ca. über 1.000 m) zu den sich auf der östlichen Seite befindenden Senkungsmaxima ermittelt. Bei der Kombination „RO-15 & RO-139“ kommt diese Abweichung auf der westlichen Seite nur einmal vor. Da die ermittelten Y-Koordinaten der beiden Kombinationen sich zum großen Teil beim gleichen Wert befinden, können die aus den westlichen Süd-Nord-Profilen berechneten Y-Koordinaten als Ausreißer betrachtet werden. Diese großen Abweichungen können bei den aus den West-Ost-Profilen ermittelten X-Koordinaten nicht festgestellt werden.

Aus den mittleren Werten dieser ermittelten X- und Y-Koordinaten ergeben sich die Koordinaten der Senkungsmittelpunkte für die zwei kombinatorischen Berechnungen. Um den Einfluss des einzelnen Ausreißers zu reduzieren, wird statt des arithmetischen Mittelwertes der Medianwert der jeweiligen Reihen der ermittelten X- und Y-Koordinaten verwendet. Die somit ermittelten Senkungsmittelpunkte der beiden Konstellationskombinationen befinden sich auf den in Tabelle 14

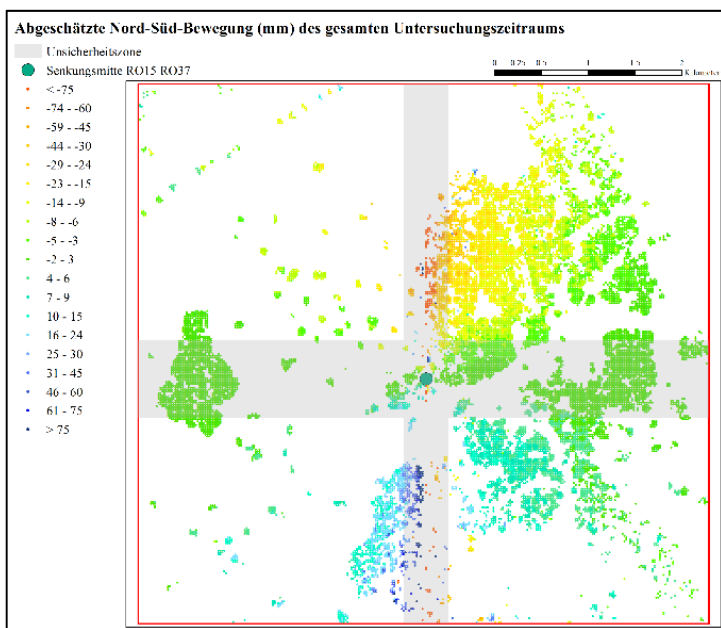
eingetragenen Koordinaten. Die Standardabweichungen der über deren Medianwerte ermittelten X- und Y-Koordinaten wurden ebenfalls berechnet.

Tabelle 14: Ermittelte Koordinaten der Senkungsmitte im lokalen Koordinatensystem und deren Unsicherheiten

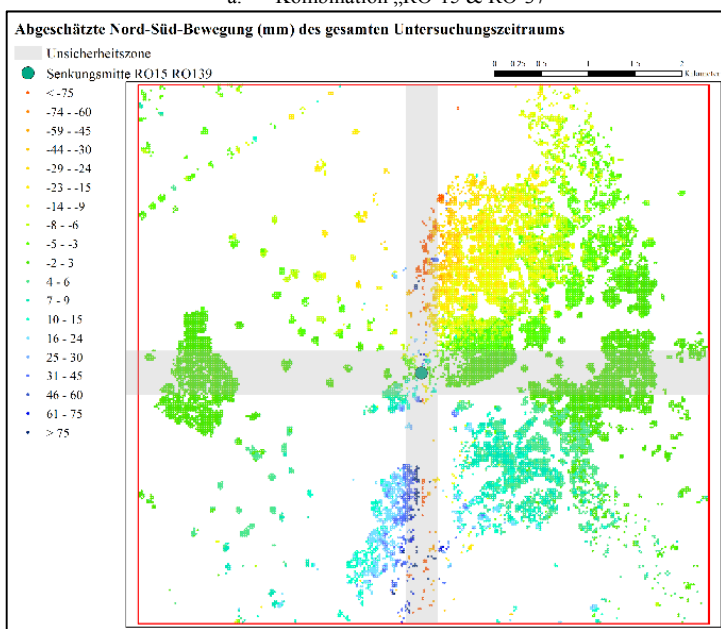
| | Ermittelte Koordinaten der Senkungsmittelpunkte (m) | Standardabweichung des X-Koordinaten (m) | Standardabweichung des Y-Koordinaten (m) |
|----------------|---|--|--|
| RO-15 & RO-37 | [3.078,59, 2.614,58] | 237,46 | 417,89 |
| RO-15 & RO-139 | [3.028,23, 2.682,08] | 169,11 | 238,30 |

Mittels der Koordinaten der Gitterpunkte und der ermittelten Koordinate der Senkungsmitte können aus den bereits vorhandenen gesamten Ost-West-Bewegungen nach Formel (6-15) die gesamten Nord-Süd-Bewegungen für die jeweiligen Konstellationskombination berechnet werden.

Hierbei ist es zu beachten, dass nach Formel (6-15) die Differenz zwischen den X-Koordinate der Senkungsmitte und des zu ermittelnden Gitterpunktes nicht null sein darf. Auf der anderen Seite wird die Nord-Süd-Bewegung nach Formel (6-15) als null berechnet, wenn dementsprechend die Ost-West-Bewegung null ist. Diese Eigenschaften der Formel (6-15) führt dazu, dass die Nord-Süd-Bewegung auf der bzw. um die Nord-Süd-Achse, die durch die Senkungsmitte geht, nicht berechenbar ist, weil die berechneten Ergebnisse entweder wegen der nahe Null gelegenen Differenzen der X-Koordinaten unendlich groß werden, oder aufgrund der Null betragenden Ost-West-Bewegung Null ergeben. Um die dadurch entstehenden Widersprüche zur Modellvorstellung zu vermeiden, können hierbei nur die Gitterpunkte, die eine Ost-West-Bewegung aufweisen, verwendet werden. Die Ergebnisse werden in Abbildung 99 dargestellt. Hierbei werden die Schwankungsbereiche der jeweiligen ermittelten Koordinaten der Senkungsmitte mit deren einfacher Standardabweichung bzgl. des Medianwertes als die Unsicherheitszone mit transparenten grauen Flächen markiert.



a. Kombination „RO-15 & RO-37“



b. Kombination „RO-15 & RO-139“

Abbildung 99: Abgeschätzte Nord-Süd-Bewegung des Senkungsgebietes für den gesamten Untersuchungszeitraum

Quantitativ stellen die beiden Grafiken der Abbildung 99 jeweils 14.705 („RO-15 & RO-37“), bzw. 15.752 („RO-15 & RO-139“) Gitterpunkte im Senkungsgebiet dar, für die Nord-Süd-Bewegungen für den gesamten Zeitraum berechnet wurden. Basierend auf dem obengenannten Verfahren zeigen die ermittelten Nord-Süd-Bewegungen für den gesamten Zeitraum grobe Übereinstimmung zur in Abbildung 27c dargestellten Modellvorstellung. Markant hervortreten die Gemeinsamkeiten, vor allem an der nördlichen Seite der Senkungsmitte, wo deutlich die Bewegungen nach Süden, gekennzeichnet durch die negativen Vorzeichen und die rötliche Farbe, zu erkennen sind. Gleiches gilt für die nach Norden gerichteten Bewegungen im südlichen Bereich, welche einen positiven Wert und blaue Farbe aufweisen. Diese Bewegungen sollten auf der durch die Senkungsmitte verlaufenden Nord-Süd-Achse ihren maximalen Betrag erreichen und mit zunehmendem Abstand davon geringer werden. Bei der Berechnung können zwar entlang der Nord-Süd-Achse der Senkungsmulde keine Werte ermittelt werden, trotzdem weisen die Nord-Süd-Bewegung den erwarteten abnehmenden Gradienten von der Mitte nach Osten und Westen hin auf.

Wie beschrieben lassen sich Gitterpunkte mit erwarteten relativ großen Nord-Süd-Bewegungen entlang der Nord-Süd-Achse der Senkungsmulde beobachten. Solche Gitterpunkte befinden sich innerhalb der in Abbildung 99 dargestellten Unsicherheitszonen der X-Koordinaten. Allerdings zeigen auf der südlichen Seite der Senkungsmulde einige Gitterpunkte teilweise sogar große Beträge (über 100 mm) mit einem umgekehrten Vorzeichen im Vergleich zur modellentsprechenden Umgebung.

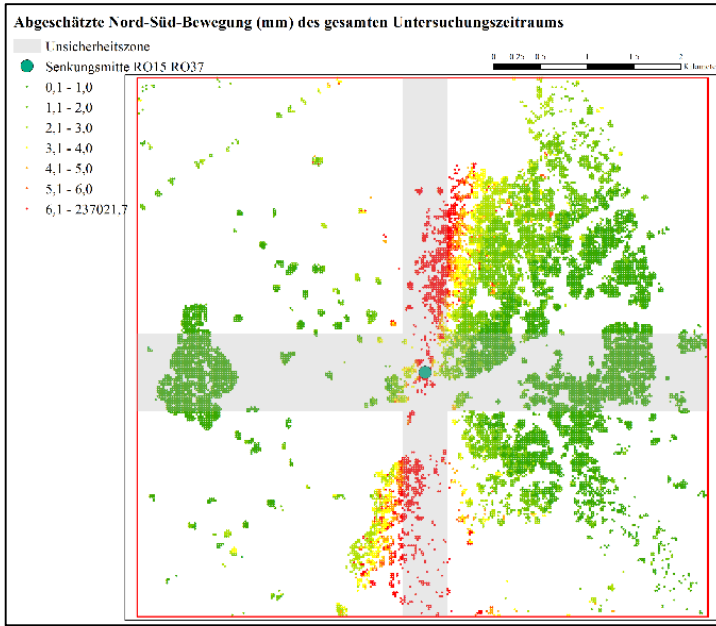
Diese unrealistischen und entgegen gerichteten großen Werte der Nord-Süd-Bewegung in diesem Bereich wurden durch die extrem kleinen Differenzen zwischen den X-Koordinaten bzw. daraus resultierten extrem kleinen Tangenswerte des Azimuts verursacht. Die Unsicherheiten der ermittelten X-Koordinaten können darüber hinaus zum Vorzeichenwechsel in diesem Bereich führen. Es ist daher zu bedenken, inwiefern die somit berechnete Nord-Süd-Bewegung im Hinblick auf der Unsicherheit der ermittelten Koordinaten der Senkungsmitte und der Unsicherheit der gesamten Ost-West-Bewegung signifikant ist.

Um die Signifikanz für die berechnete Nord-Süd-Bewegung zu überprüfen, wurde die Standardabweichung $s_{d_N}(O, N)$ der Nord-Süd-Bewegung im gesamten Zeitraum mittels des Varianzfortpflanzungsgesetzes wie folgt abgeleitet:

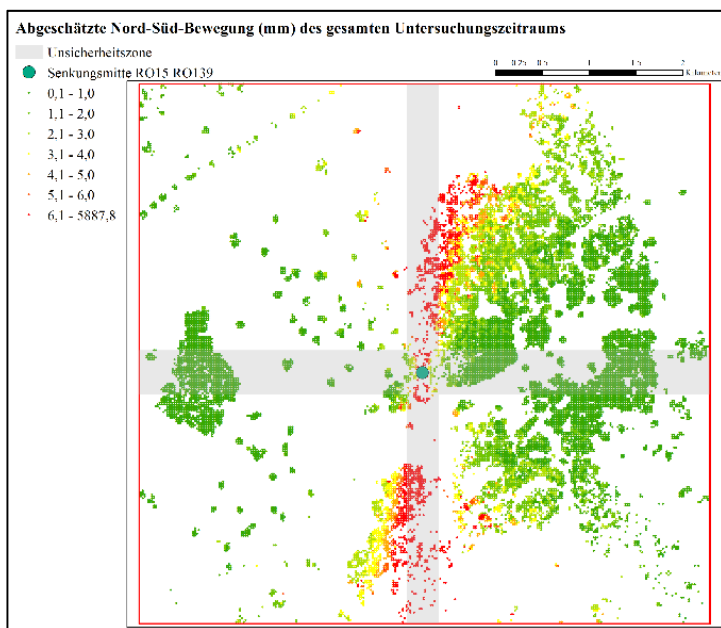
$$s_{d_N}^2(O, N) = \left(\frac{N - N_{\max d_Z}}{O - O_{\max d_Z}} \right)^2 \cdot s_{d_O}^2(O, N) + \left[0 - \frac{d_O(O, N)}{O - O_{\max d_Z}} \right]^2 \cdot s_{N_{\max d_Z}}^2 + \left[d_O(O, N) \cdot (N - N_{\max d_Z}) \cdot \frac{1}{(O - O_{\max d_Z})^2} \cdot (-1) \right]^2 \cdot s_{O_{\max d_Z}}^2$$

$$= \left(\frac{N - N_{\max d_Z}}{O - O_{\max d_Z}} \right)^2 \cdot s_{d_O}^2(O, N) + \left[-\frac{d_O(O, N)}{O - O_{\max d_Z}} \right]^2 \cdot s_{N_{\max d_Z}}^2 + \left[-\frac{d_O(O, N) \cdot (N - N_{\max d_Z})}{(O - O_{\max d_Z})^2} \right]^2 \cdot s_{O_{\max d_Z}}^2. \quad (6-17)$$

Dabei entsprechen $s_{N_{\max d_Z}}$ und $s_{O_{\max d_Z}}$ den in Tabelle 14 angegebenen Standardabweichungen der ermittelten Koordinaten, und $s_{d_N}(O, N)$ ist die ortsabhängige Standardabweichung der Ost-West-Bewegungsdifferenzen (vgl. Abbildung 88 und Abbildung 89) zwischen dem ersten und letzten Datum. Die Koordinaten der Gitterpunkte, an denen die Standardabweichungen berechnet werden sollten, werden als fehlerfrei betrachtet. Für die beiden Kombinationen ist die räumliche Verteilung dieser Standardabweichungen der Nord-Süd-Bewegung in Abbildung 100 dargestellt.



a. Kombination „RO-15 & RO-37“



b. Kombination „RO-15 & RO-139“

Abbildung 100: Standardabweichungen der abgeschätzten Nord-Süd-Bewegung des gesamten Untersuchungszeitraums

Die räumliche Verteilung der Standardabweichung der Nord-Süd-Bewegung zeigt vor allem eine Abhängigkeit vom Azimut der Horizontalbewegung. Je näher das Azimut zu 0° (Nordrichtung) und 180° (Südrichtung) liegt, desto größer wird die Standardabweichung. Dies erklärt die Unsicherheit in den vorherigen Ergebnissen entlang der Nord-Süd-Achse, wo die ermittelten Nord-Süd-Bewegungen mit großen Beträgen entgegen der zur Senkungsmitte gerichteten Bewegung aufgetreten sind.

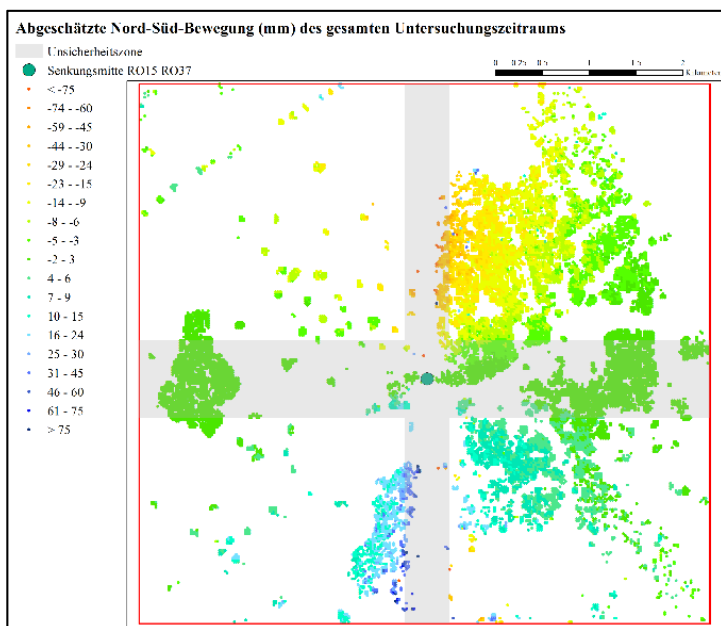
Diese Standardabweichung bietet hierbei auch die Möglichkeit an, die funktionswertbezogene gesamte Nord-Süd-Bewegung im Hinblick auf ihrer Standardabweichung und ihre Signifikanz zu beurteilen. Die Signifikanz einer berechneten Höhenänderungsdifferenz kann mit Hilfe des Quotienten aus der Nord-Süd-Bewegung und seiner Standardabweichung berechnet werden. Bei Festlegung einer Signifikanzschwelle von 99 % kann der Betrag des Quotienten größer 2,57 angenommen werden, damit die Höhenänderungsdifferenz als signifikant bezeichnet werden kann. Nord-Süd-Bewegungen mit einem Betrag von weniger als 2 mm werden hierbei nicht betrachtet und es ist somit keine Signifikanzprüfung an diesen Gitterpunkten erforderlich. Dieses Signifikanzniveau entspricht dem

der Ost-West-Bewegungen und wird aufgrund der erwarteten Vergleichbarkeit der beiden horizontalen Bewegungskomponenten übernommen.

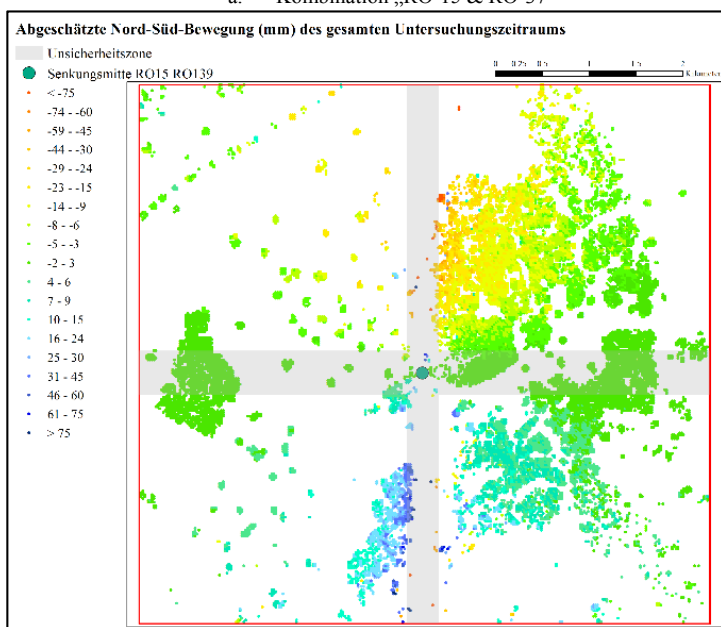
Die Anwendung dieses Tests auf alle Zeitreihen ergab, dass 839 Gitterpunkte (ca. 5,7 %) der Kombination von „RO-15 & RO-37“ nicht signifikante Höhenänderungsdifferenzen aufweisen und 771 Gitterpunkte (7,4 %) der Kombination von „RO-15 & RO-139“. In Abbildung 101 werden die signifikanten gesamten Nord-Süd-Bewegungen für den gesamten Untersuchungszeitraum 04/2015 – 05/2018 dargestellt.

Im Vergleich zu den in Abbildung 100 dargestellten Nord-Süd-Bewegungen wurden hauptsächlich die Gitterpunkte mit extremen Werten um die Nord-Süd-Achse der Senkungsmulde durch die Signifikanzprüfung detektiert und herausgenommen. In der Nähe der Ost-West-Achse, sowie auch der Senkungsmitte, zeigt sich keine Nord-Süd-Bewegung. Vereinzelt treten zwar Gitterpunkte im Bereich der Unsicherheitszone der X-Koordinate auf, welche über eine Nord-Süd-Bewegung von mehr als 20 mm verfügen. Allerdings weisen über 90% der berechneten Gitterpunkte einen Betrag der gesamten Nord-Süd-Bewegungen von weniger als 20 mm auf, was vergleichbar mit den gesamten Ost-West-Bewegungen (bis 16 mm) ist. Die somit ermittelte gesamte Nord-Süd-Bewegung kann daher als realistisch betrachtet werden.

Auf Basis der Formeln (4-19) und (4-20) aus Kapitel 4.3.2 können die noch in den kombinatorisch berechneten Höhenänderungen verbleibenden, systematischen Abweichungen mithilfe der hiermit ermittelten Nord-Süd-Bewegungen für den gesamten Zeitraum berechnet werden. Diese systematischen Abweichungen an den Gitterpunkten, für die eine Nord-Süd-Bewegung ermittelt wurde, stellen sich in Abbildung 102 dar.



a. Kombination „RO-15 & RO-37“

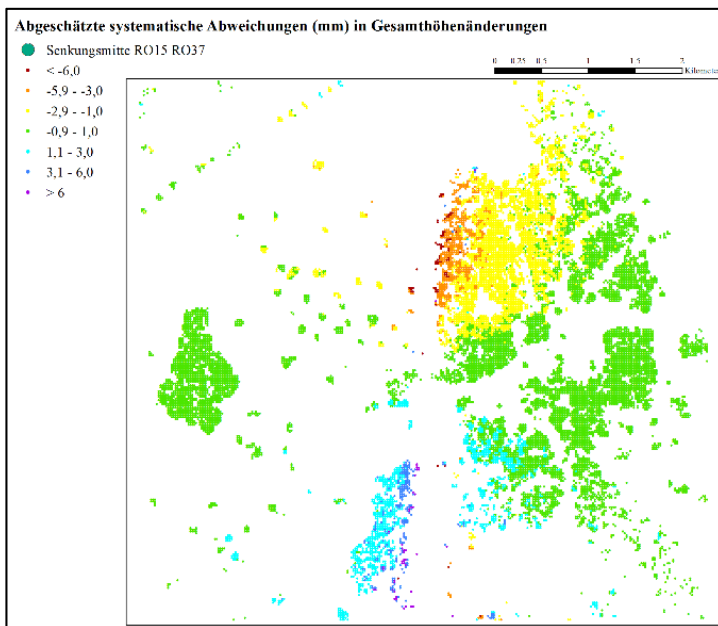


b. Kombination „RO-15 & RO-139“

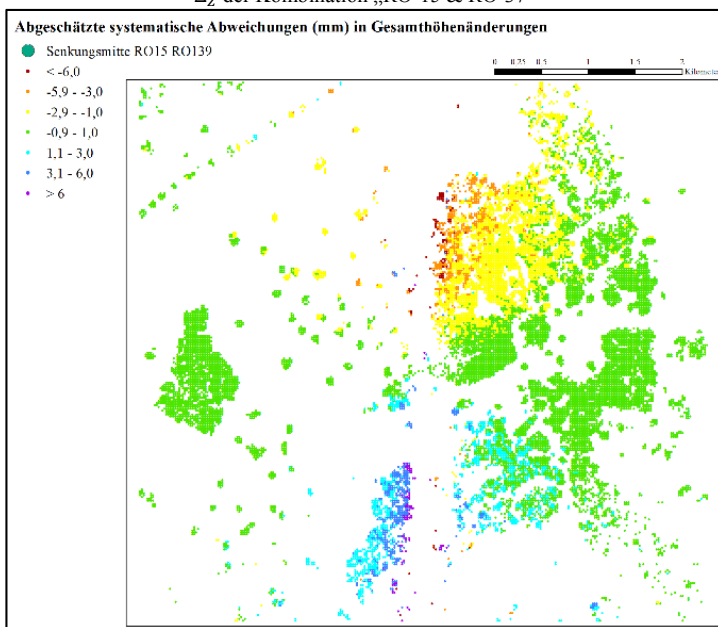
Abbildung 101: Signifikante, abgeschätzte Nord-Süd-Bewegung des Senkungsgebietes für den gesamten Untersuchungszeitraum

In Abbildung 102 werden linksseitig die systematischen Abweichungen der Höhenänderungen dargestellt. Dabei lassen sich bei den beiden Konstellationskombinationen identische Tendenzen in der Fläche erkennen, welche der räumlichen Verteilung der ermittelten Nord-Süd-Bewegung in Abbildung 102 entsprechen. Östlich und Westlich der Senkungsmitte wird jeweils die Hälfte der Fläche des Senkungsgebietes von der grünen Farbe bedeckt, was auf eine systematische Abweichung von unter 1 mm über den gesamten Untersuchungszeitraum hindeutet. Dies ist eindeutig unterhalb der messtechnisch signifikanten Beträge für die Erfassung von Höhenänderungen. In solchen Bereichen können daher die kombinativ berechneten Höhenänderungen als fehlerfrei betrachtet werden. Die zweitgrößten Flächen werden durch die gelben und hellblauen Farben jeweils auf der nördlichen und südlichen Seite der Senkungsmitte ausgeprägt. Diese Farben indizieren jeweils eine Unterschätzung von Senkungen im Norden und eine Überschätzung von Senkungen im Süden mit einem Betrag unter 3 mm. Bezogen auf den gesamten Zeitraum ist in solchen Bereichen die systematische Abweichung in der Höhenänderung von durchschnittlich unter 1 mm pro Jahr zu erwarten. Die orangenen und dunkelblauen Flächen können eine systematische Abweichung in der kombinativ berechneten Höhenänderung in der Größenordnung von unter 6 mm bedeuten, was für das Fallbeispiel durchschnittlich unter 2 mm pro Jahr entspricht. In diesen Bereichen müssen die kombinativ berechneten Höhenänderungen als mit Abweichungen zur Realität behaftet betrachtet werden. Ganz selten befinden sich entlang der Nord-Süd-Achse der Senkungsmulde noch Gitterpunkte mit dunkelroter und lila Farbe, welche damit gekennzeichnet eine systematische Abweichung von über 6 mm aufweisen. Dies betrifft 52 von 13.866 Gitterpunkten bei der Kombination „RO-15 & RO-37“ und 80 von 14.981 Gitterpunkten bei der Kombination „RO-15 & RO-139“, welche große, wie auch signifikante, Nord-Süd-Bewegungen zeigen und sich nur in der Nähe der Nord-Süd-Achse befinden. Diese Gitterpunkte können aufgrund der Modellvorstellung eine höhere Nord-Süd-Bewegung und dadurch eine höhere systematische Abweichung aufweisen. Es ist jedoch wegen der Ortslage dieser Gitterpunkte im Hinblick auf der Unsicherheit der ermittelten Nord-Süd-Bewegungen zu bedenken, dass die Größenordnung der damit abgeschätzten systematischen Abweichungen auch unsicher sein kann.

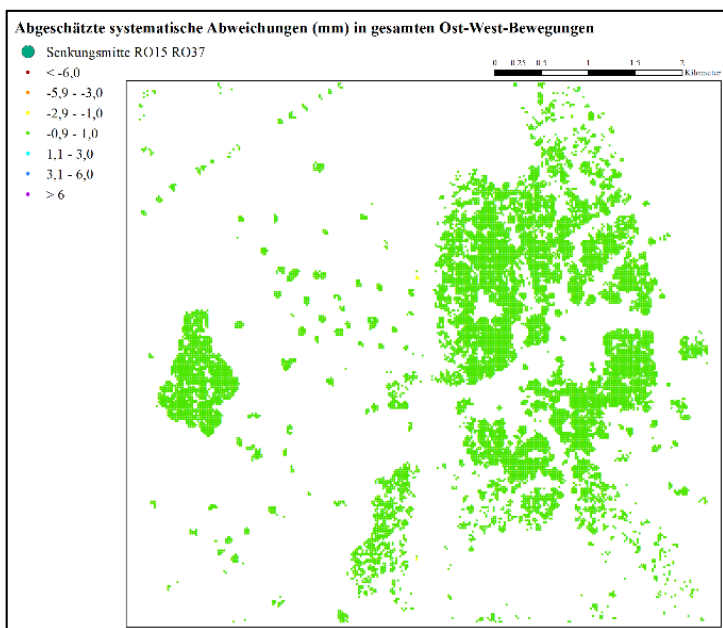
Die systematischen Abweichungen in der kombinativ berechneten Ost-West-Bewegung sind bei beiden Kombinationen weiter unter 1 mm (mit grüner Farbe) für den gesamten Zeitraum. Dies entspricht auch der zuvor abgeschätzten Größenordnung dieser Fehler. Daher lässt sich die Verwendung von der kombinativ berechneten Ost-West-Bewegung für das Fallbeispiel als abweichungsfrei nachweisen.



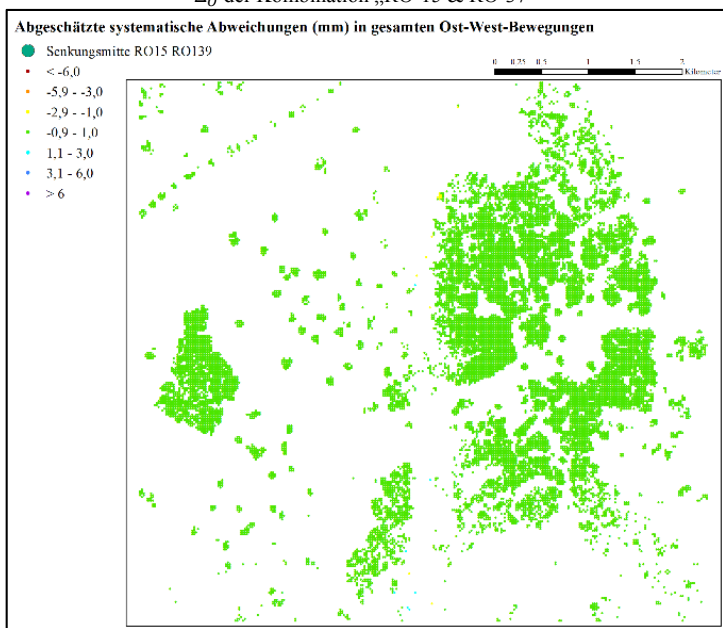
Δ_Z der Kombination „RO-15 & RO-37“



Δ_Z der Kombination „RO-15 & RO-139“



Δ_o der Kombination „RO-15 & RO-37“



Δ_o der Kombination „RO-15 & RO-139“

Abbildung 102: Die systematischen Abweichungen für den gesamten Zeitraum, berechnet aus der ermittelten Nord-Süd-Bewegungskomponente

7 Zusammenfassung und Empfehlungen

7.1 Zusammenfassung

Die Sentinel-1-Mission stellt jedem Anwender SAR-Datensätze kostenlos zur Verfügung, welche für Europa nahezu flächendeckend und mit relativ konstantem Wiederholungszyklus automatisch erhoben werden. Damit bieten sich neue Chancen für die vermehrte Anwendung einer kombinativen, mindestens bidirektionalen Berechnung der Bodenbewegungskomponenten. Die Untersuchung über die Datenverfügbarkeit von Sentinel-1-Aufnahmen (unter Verwendung des IW-Modus) in Kapitel 4.1.4 hat gezeigt, dass für beliebige Gebiete in Europa mindestens je einen Datensatz (Track) von Ascending und Descending zur Verfügung steht, und der europäische Raum in großen Teilen mindestens zweifach aus derselben Aufnahmerichtung aufgezeichnet wird. Für manche Gebiete im Norden Europas, z. B. in Skandinavien, besteht sogar die Möglichkeit, drei bis vier LoS-Messungen aus einer Aufnahmerichtung mit verschiedenen Einfallswinkeln zu erhalten.

Aufgrund dieser Verfügbarkeit ergibt sich gleichzeitig ein höheres Interesse an der Anwendung radarinterferometrischer Verfahren, und an den Qualitätsaussagen über die damit ermittelten Bodenbewegungskomponenten. Bisherige Anwendungen beschränkten sich hauptsächlich auf die Ableitung einer Bewegungskomponente (Höhenänderung) mittels einer LoS-Messung. Darüber hinaus erfolgte die Weiterentwicklung von Verfahren zur Verbesserung der statistischen Qualität auf Grundlage von drei oder mehr Aufnahmegeometrien, welche aufgrund des erhöhten Auswerte- und Datenbeschaffungsaufwandes selten zu Anwendung kommen. Die systematischen Abweichungen von abgeleiteten Höhenänderungen bei der Anwendung von Daten aus einer Einzelaufnahmegeometrie wurden zunehmend in Veröffentlichungen und Berichten diskutiert, wie auch durch Simulationen und Vergleichen mit geodätisch bestimmten Veränderungen visualisiert. Auf die Fehlereinflüsse des Verfahrens mittels der Zweiaufnahmegeometrie sind bisher nur wenige Veröffentlichungen eingegangen. Da die Ansätze mit weniger als drei LoS-Messungen als Eingangsdaten eine wirtschaftlich vertretbare Anwendbarkeit, bei gleichzeitiger Reduktion systematischer Abweichungen in den abgeleiteten Bodenbewegungskomponenten, für die meisten Anwendungsbedürfnisse darstellen, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Untersuchung und Bewertung von kombinativ berechneten Bodenbewegungskomponenten aus zwei LoS-Datensätzen, also mit sich kreuzenden und parallelen Tracks. Da die auf Grundlage der Zweiaufnahmegeometrie ermittelten Ergebnisse durch verschiedene Fehler- und Rauscheinflüsse belastet sind, nehmen

die Untersuchung systematischer Abweichungen und die Ableitung von Qualitätsaussagen in dieser Arbeit einen breiten Raum ein.

Durch die kombinatorische Berechnung mit sich kreuzenden Tracks ergeben sich als Ergebnisse die Ost-West-Bewegungskomponente und die Höhenänderung. Dabei wird die Horizontalbewegung in Nord-Süd-Richtung aufgrund der Sensorunempfindlichkeit nicht berücksichtigt, wodurch annahmebedingte systematische Abweichungen in den beiden Bodenbewegungskomponenten entstehen. Die theoretischen Ableitungen zur kombinatorischen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks in Kapitel 4.3 zeigen, dass die systematischen Abweichungen in den ermittelten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen von der verwendeten Konstellationskombination und der unbekannten, tatsächlichen Nord-Süd-Bewegung abhängig sind. Die systematischen Abweichungen in der kombinatorisch berechneten Höhenänderung und der Ost-West-Bewegung lassen sich durch die Multiplikation von konstellationsbedingten ε -Faktoren (ε_Z und ε_O) mit der Nord-Süd-Bewegung beschreiben. Die tatsächliche Nord-Süd-Bewegung ist ohne weitere Messungen oder Modellannahmen unbekannt. Die ε -Faktoren hängen sowohl von den Größen der Einfallswinkel und der Azimute der Blickrichtungen der genutzten Aufnahmen als auch von ihren jeweiligen Winkeldifferenzen ab. Es zeigt sich, dass der größte ε_Z -Faktor bei der kombinatorischen Berechnung nur halb so groß wie der entsprechende, konstellationsbedingte Multiplikator der Einzelaufnahmegeometrie (bei einem Einfallswinkel von 30°) ist. Das belegt, dass die kombinatorisch berechneten Höhenänderungen deutlich geringere systematische Abweichungen aufweisen, als bei der Einzelaufnahmegeometrie.

Ebenfalls sind die statistischen Unsicherheiten der kombinatorisch berechneten Bewegungskomponenten mithilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes bestimmt worden. Sie lassen sich mit Hilfe von ς -Faktoren, die den Einfluss der Aufnahmekonstellation wiedergeben, und den jeweiligen Unsicherheiten der Eingangsdaten (PSI-Ergebnisse) beschreiben. Durch die Untersuchung der ς -Faktoren der kombinatorisch berechneten Höhenänderung und Ost-West-Bewegung stellte sich heraus, dass bei einer identischen Konstellationskombination mit Einfallswinkeln kleiner als ca. 45° die kombinatorisch berechneten Ost-West-Bewegungen immer eine höhere statistische Unsicherheit als die Höhenänderungen besitzen.

Durch die kombinatorische Berechnung mit parallelen Tracks kann nur die Höhenänderung ermittelt werden. Dabei werden die nahezu gleichen Azimute der Blickrichtungen der zwei verwendeten Datensätze als identisch betrachtet, wodurch eine annahmebedingte systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung entsteht. Die theoretische Ableitung zur kombinatorischen Berechnung mit parallelen Tracks in Kapitel 4.4 zeigte, dass die systematische Ab-

weichung in den ermittelten Höhenänderungen auch von der verwendeten Konstellationskombination und der tatsächlichen Horizontalbewegung abhängig ist. Dabei zeigte sich, dass je kleiner die Einfallswinkeldifferenz ist, umso größer ist die annahmebedingte Abweichung in der ermittelten Höhenänderung. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die statistische Unsicherheit der Ergebnisse bei diesem Ansatz, wie zu erwarten war, aufgrund der ungünstigen Geometriekonstellation sehr hoch ist. Die ζ -Faktoren sind mindestens zehnfach größer als die ζ -Faktoren bei der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks.

Die in dieser Arbeit abgeleiteten Theorien wurden in Kapitel 6 anhand der Ergebnisse des in Kapitel 5 beschriebenen Fallbeispiels erprobt. Das Fallbeispiel beinhaltet ein Untersuchungsgebiet mit einer Ausdehnung von ca. 11 km x 11 km, in dem sich ein Senkungsgebiet (ca. 6 km x 6 km) mit einer klassischen Trogform befindet.

Die kombinatorische Berechnung mit parallelen Tracks ergab, dass die Standardabweichung s_z für die Höhenänderung mit einem Mittelwert von 14,7 mm („RO-37 & RO-139“) deutlich größer ist, als die aus den mit sich kreuzenden Tracks ermittelten Ergebnissen von 2,3 mm („RO-15 & RO-37“) und 2,7 mm („RO-15 & RO 139“). Dies bestätigt die Größenordnung der aus den theoretischen Betrachtungen ermittelten Werte der Standardabweichungen. Die deutlich höhere Standardabweichung für die kombinatorische Berechnung mit parallelen Tracks ist auch aus den exemplarisch dargestellten Zeitreihen in Abbildung 67 in Kapitel 5.3.1 ersichtlich. In den Höhenänderungszeitreihen ist die größere Unsicherheit durch die größeren Schwankungen in den Zeitreihen der kombinativen Berechnung mit parallelen Tracks deutlich zu erkennen, wohingegen die beiden Zeitreihen aus der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks nahezu übereinstimmen. Ein direkter Vergleich der ausgeglichenen Höhenänderungswerte für einen bestimmten Zeitraum ist wegen der hohen Unsicherheit des mit parallelen Tracks kombinativ berechneten Ergebnisses wenig aussagefähig.

Aus der kombinativen Berechnung mit sich kreuzenden Tracks ergab sich eine Standardabweichung für die Ost-West-Bewegung in der gleichen Größenordnung wie für die Höhenänderung. Die Mittelwerte der Standardabweichung s_o für die Ost-West-Bewegung lagen bei 3,1 mm („RO-15 & RO-37“) und 3,2 mm („RO-15 & RO 139“). Die statistischen Unsicherheiten der abgeleiteten Ost-West-Bewegungen sind somit gleich. Zusätzlich haben sich diese ermittelten Werte kleiner als die mithilfe der Varianzfortpflanzung berechneten s_o erwiesen.

Die Analyse der systematischen Einflüsse wurde für das Fallbeispiel mit Hilfe der folgenden fünf Schritte realisiert:

1. Gitterpunktbezogene Berechnung der ortsabhängigen ε -Faktoren

2. Definition der Modellvorstellung
3. Abschätzung der maximalen systematischen Abweichungen mithilfe eines aus dem Ost-West-Bewegungsprofil ablesbaren maximalen Betrags der Ost-West-Bewegung
4. Gitterpunktbezogene Berechnung der Nord-Süd-Bewegung, auf Grundlage einer ermittelten, auf der Modellvorstellung basierenden Senkungsmittel für den gesamten Untersuchungszeitraum
5. Gitterpunktbezogene Berechnung der systematischen Abweichungen durch die Multiplikation der ermittelten Nord-Süd-Bewegung und ε -Faktoren

Durch den ersten Schritt konnte die Größenordnung dieser Faktoren zur Berechnung der systematischen Abweichungen bestimmt werden, wodurch bereits die Größenordnung der systematischen Abweichungen in den bestimmten beiden Bewegungskomponenten über einen angenommenen Betrag der Nord-Süd-Bewegung abgeschätzt werden kann. Ein Vergleich der ε -Faktoren zeigt, dass die ε_O -Faktoren deutlich kleiner als die ε_Z -Faktoren sind und lediglich eine Größe von einem Zehntel der jeweiligen ε_Z -Faktoren besitzen. Vergleicht man die Wertebereiche eines ε -Faktors über das gesamte Untersuchungsgebiet, unterscheiden sich die jeweiligen ε -Faktoren erst ab der dritten Nachkommastelle. Daraus ließe sich ableiten, dass die ε -Faktoren für relativ kleine Untersuchungsgebiete (wie das Fallbeispiel mit ca. 6 km x 6 km) kaum variieren.

Eine Abschätzung von Horizontalbewegungen in Nord-Süd-Richtung kann, insbesondere bei kreisrunden Senkungströgen, erfolgen, indem für sie dieselbe Größenordnung der Ost-West-Bewegung angenommen wird. Im Fallbeispiel verursachen die ε_Z -Faktoren von ca. 0,15 mit einer so angenommenen Nord-Süd-Bewegung von 20 mm systematische Abweichungen in der Höhenänderung von 3 mm. Generell führt eine Nord-Süd-Bewegung mit einem positiven Vorzeichen, d. h. eine Bewegung nach Norden, zu einem systematischen Fehler in der Richtung weg vom Sensor. Dies führt bei einem Senkungsfall zu einer Überschätzung von Senkungen, und bei einem Hebungsfall zu einer Unterschätzung der Hebungen. Eine solche Abschätzung kann auch für die kombinatorisch ermittelte Ost-West-Bewegung durchgeführt werden. So wird eine Nord-Süd-Bewegung von 20 mm in der Ost-West-Bewegung zu einem systematischen Fehler von 0,26 mm führen, einer Größenordnung die in Relation zur Gesamtbewegung als vernachlässigbar angesehen werden dürfte.

Die ε -Faktoren können auch dazu genutzt werden, bei Angabe einer signifikanten Größenordnung für die systematischen Abweichungen einen relevanten, minimalen Wert für die aufgetretene Nord-Süd-Bewegung zu berechnen. Somit ergäbe sich als Konsequenz einer (zulässigen) systematischen Abweichung in der Höhenänderung von 1,0 mm, dass die Nord-Süd-Bewegung 6,7 mm (ε_Z -Faktor = 0,15) betragen müsste. Bei einem gleichgroßen (zulässigen) Wert für

die Ost-West-Bewegung müsste die Nord-Süd-Bewegung einen Betrag von 76,9 mm (ε_Z -Faktor = 0,013) annehmen. Diese Abschätzungen ermöglichen Aussagen darüber, ob die systematischen Abweichungen in den beiden Bewegungsrichtungen größer als signifikante Werte für die Bodenbewegungskomponenten sein werden. So könnte für das Fallbeispiel gefolgert werden, dass eine Überschreitung des Wertes der Nord-Süd-Bewegung von 6,7 mm wahrscheinlicher ist als die Überschreitung des Wertes von 76,9 mm. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass systematische Abweichungen in den kombinativ ermittelten Höhenänderungen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind, als in den berechneten Ost-West-Bewegungen.

Da diese zuvor beschriebenen Abschätzungen können für jedes andere Bodenbewegungsgebiet durchgeführt werden, da die konstellationsbedingten Einfallswinkel und Azimute der Blickrichtungen bekannt sind. Damit kann in der Praxis bereits im Vorfeld eine Aussage darüber getroffen werden, ob die möglichen systematischen Abweichungen infolge der Vernachlässigung von Nord-Süd-Bewegungen überhaupt eine signifikante Größenordnung erreichen können.

Existiert eine Modellvorstellung für die untersuchungsfallspezifische Abschätzung dieser systematischen Abweichungen, können die systematischen Abweichungen umso realitätsnäher abgeschätzt werden. Durch die Verwendung der Ost-West-Bewegungsprofile konnte für das Fallbeispiel der maximale Betrag der systematischen Abweichungen ohne Ortsbezug abgeschätzt werden. Mithilfe der aus den Höhenänderungsprofilen ermittelten Koordinaten der Senkungsmitte war es möglich, die gitterpunktbezogenen Horizontalbewegungsrichtungen unter Annahme einer hier zutreffenden Modellvorstellung zu berechnen, und damit die Nord-Süd-Bewegung (anhand der kombinativ berechneten Ost-West-Bewegung) zu bestimmen. Da sich die systematischen Abweichungen in der kombinativ berechneten Ost-West-Bewegung aufgrund der durchgeführten Abschätzung als nicht signifikant erwiesen haben, kann davon ausgegangen werden, dass auch in der daraus berechneten Nord-Süd-Bewegung keine signifikanten, systematischen Abweichungen enthalten sind.

Ein erstes Ergebnis für diese Nord-Süd-Bewegungen zeigte ein modellentsprechendes Bild, bis auf den Bereich um die Nord-Süd-Achse der Senkungsmulde. Dort besitzen die ermittelten Nord-Süd-Bewegungen einen unrealistisch großen Betrag wegen der extrem kleinen Azimute der Horizontalbewegungen. Diese Erscheinung konnte durch den Signifikanztest bzgl. der Unsicherheiten in den ermittelten Koordinaten der Senkungsmitte und der Unsicherheit der Ost-West-Bewegung verbessert werden. Anhand dieser signifikanten Nord-Süd-Bewegungen konnten schließlich die gitterpunktbezogenen systematischen Abweichungen

gen berechnet werden. Für die Höhenänderungen ließen sich so realistische Beträge der systematischen Abweichungen von kleiner als 6 mm für über 99% der Gitterpunkte im Senkungsgebiet ermitteln, welche größenordnungsmäßig auch dem Ergebnis im zweiten Schritt entsprechen.

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass mit Hilfe des gewählten Ansatzes, basierend auf einer Modellvorstellung, die Abschätzung von maximalen systematischen Abweichungen in den ermittelten beiden Bewegungskomponenten möglich ist.

Hierbei ist es zu beachten, dass der für das Fallbeispiel benutzte Ansatz auf der Modellierung von Höhenänderungsprofilen bzgl. der Gesamthöhenänderung beruht. Da die Ermittlung des Funktionsminimums eines approximierten Trends der ortsabhängigen Höhenänderungen nur bei einem Senkungsprofil, das deutlich trogförmige Höhenänderungen mit signifikanten Senkungsbeträgen aufweist, eindeutig bestimmbar ist, stößt dieses Verfahren bei flachen Senkungsmulden (infolge kleiner Höhenänderungsunterschiede z. B. auch aufgrund kurz gewählter Zeiträume) an seine Grenzen.

7.2 Empfehlung zur Reduktion der statistischen Unsicherheiten

Um eine möglichst kleine statistische Unsicherheit in der Höhenänderung zu erhalten, sollte die Einfallswinkel von Ascending und Descending möglichst steil, sowie die Blickrichtungen in der Horizontalebene möglichst parallel zur Ost-West-Achse verlaufen. Im Gegensatz dazu sollten für die kleinere statistische Unsicherheit in der Ost-West-Bewegung flache (große) Einfallswinkel gewählt werden, während die Blickrichtungen parallel zur Ost-West-Richtung verlaufen.

Die statistische Qualität der aus sich kreuzenden Tracks kombinatorisch berechneten Höhenänderungen unterscheidet sich für die wählbaren Konstellationen nur in einem geringen Maße. Diese Qualität der Höhenänderung ist deutlich besser als die der aus parallelen Tracks berechneten Höhenänderung.

Um eine mittlere Standardabweichung der kombinatorisch berechneten Höhenänderung aus sich kreuzenden Tracks von kleiner als 2 mm zu erhalten, müssten die mittleren Standardabweichung der eingeführten PSI-Daten 2,0 mm (bei „RO-15 und RO-139“) bzw. 2,3 mm (bei „RO-15 und RO-37“) betragen.

Wenn die zu ermittelnden Ost-West-Bewegungskomponenten eine mittlere Standardabweichung von ebenfalls kleiner als 2 mm besitzen sollten, und man von einer gleichen statistischen Qualität der PSI-Zeitreihen ausgeht, müssten bei der kombinatorischen Berechnung mit „RO-15 und RO-139“ die PSI-Ergebnisse eine

mittlere Standardabweichung von kleiner als 1,8 mm aufweisen, und die der Kombination „RO-15 und RO-37“ 1,7 mm.

7.3 Empfehlung zur Reduktion der systematischen Abweichungen

Eine ideale Kombination der Aufnahmekonstellation mit sich kreuzenden Tracks, bei der die systematischen Abweichungen in der Ost-West-Bewegungskomponente null und in der Höhenänderung kleinstmöglich sind, ergibt sich, wenn die Einfallswinkel von Ascending und Descending gleich und möglichst steil sind sowie die Blickrichtungen in der Horizontalebene möglichst parallel zur Ost-West-Achse verlaufen.

Um einen kleinen ε_Z -Faktor zu erhalten, sollen die vertikale Blickrichtung möglichst steil sein. Gleichermäßen gilt dies auch für einen möglichst Ost-West-Achse nahen Azimut der Blickrichtung. Hierbei ist eine Besonderheit zu beachten, dass die Kombinationen mit gleichen aber flachen Einfallswinkeln, bzw. gleichen aber nördlicheren Azimuten, größere ε_Z -Faktoren verursachen, im Vergleich zu den Kombinationen, bei denen mindestens eine der beiden Aufnahmen einen steileren Einfallswinkel bzw. ein östlicheres Azimut besitzt. Diese Aussage und Empfehlung kann durch die Ergebnisse des Fallbeispiels bestätigt werden.

In der kombinatorisch berechneten Ost-West-Bewegung sind keine systematischen Abweichungen bei einer Konstellationskombination mit gleichen Einfallswinkeln und Azimuten der Blickrichtung zu erwarten. Möglichst kleine Differenzen in den beiden Winkeln dienen der Reduktion des ε_O -Faktors, während die Azimute der Blickrichtung möglichst nahe der Ost-West-Achse verlaufen sollten. Dazu muss allerdings ein weiterer Aspekt zur Verringerung systematischer Abweichungen bei der Ermittlung der Ost-West-Komponente berücksichtigt werden, der das Vorzeichen des ε_O -Faktors betrifft. Wenn die Azimut-Differenz $\Delta\alpha$ ein positives Vorzeichen besitzt, d. h. $\alpha_{ald,A} > 2\pi - \alpha_{ald,D}$, wird eine Einfallswinkeldifferenz $\Delta\theta$ mit einem negativen Vorzeichen den Betrag des ε_O -Faktors vergrößern, was für die Reduktion der systematischen Abweichung in der Ost-West-Bewegungskomponente ungünstig ist. Dies gilt auch für die Kombination mit einer negativen Azimut-Differenz und einer positiven Einfallswinkeldifferenz. In solchen Fällen, in denen die beiden Winkel bzw. deren Differenzen verschiedene Wirkungen auf die ε_O -Faktoren besitzen, müssen die ε_O -Faktoren der verschiedenen Kombinationen mit realen Konstellationsdaten berechnet werden, um über eine optimale Wahl praktisch verfügbarer Datensätze entscheiden zu können.

Obwohl die mathematisch abgeleiteten, systematischen Abweichungen in der kombinatив berechneten Höhenänderung mittels paralleler Tracks gering sein müssten, ist von einer Anwendung dieser Konstellation wegen der großen statistischen Unsicherheit, die auch in dieser Arbeit durch das Fallbeispiel bestätigt wurde, abzuraten.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die durch kombinatorische Berechnung mit sich kreuzenden Tracks ermittelten Bodenbewegungen, Höhenänderungen und Ost-West-Horizontalbewegungen, nur geringe bzw. keine systematischen Abweichungen und eine hohe statistische Qualität besitzen.

8 Literaturverzeichnis

- Airbus Defence and Space (2015): *TerraSAR-X Image Product Guide - Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery*. TerraSAR-X Image Product Guide, Heft 2.1.
- Bechor, N. & Zebker, H. (2006): *Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair*. Geophysical Research Letters, 33 (16), S. 1 - 5.
- Bourbigot, M., Johnson, H. & Piantanida, R. (2016): *Sentinel-1 Product Definition*. ESA unclassified Document (Ref. S1-RS-MDA-52-7440), Heft 2 (2. Revision).
- Busch, W., 2011. *Monitoring großflächiger Bodenbewegungen*. In: Busch, W.; Niemeier, W.; Sörgel, U. (Hrsg.): Geomonitoring Tagung 2011 – Ein Paradigmenwechsel zur Beherrschung von Georisiken - 3.-4. März 2011 Clausthal-Zellerfeld, S. 47 - 63.
- Busch, W. & Linke, J. (2014): *Räumliche Höhenänderungsanalyse auf Grundlage einer automatisierten Ausgleichung massenhaft vorliegender PSI-Zeitreihen mittels Orthogonaler Polynome*. AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 121(8/9), S. 298 - 310.
- Busch, W., Walter, D., Coldewey, W. G. & Hejmanowski, R. (2016): *Bergwerk Ibbenbüren der RAG AG. Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches*. Gutachten im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg. Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, April 2016, Clausthal-Zellerfeld.
- Busch, W., Yin, X., Coldewey, W. G. & Hejmanowski, R. (2018): *Zusammenfassende Stellungnahme. Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG*. Gutachten im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg. Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Mai 2018, Clausthal-Zellerfeld.
- Capderou, M. (2005): *Satellites: Orbits and missions*. 1. Auflage. Springer-Verlag, Paris.
- Chang, Z.; Yu, W.; Wang, W.; Zhang, J.; Liu, X. & Zhu, J. (2017): *An approach for accurately retrieving the vertical deformation component from two-track InSAR measurements*. International Journal of Remote Sensing, 38 (6), S. 1702 - 1719.
- Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas-González, M.; Devanathéry, N. & Crippa, B. (2016): *Persistent Scatterer Interferometry: A review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Band 115, S. 78 - 89.
- De Michele, M.; Raucoules, D.; De Sigoyer, J.; Pubellier, M. & Chamot-Rooke, N. (2010): *Three-dimensional surface displacement of the 2008 May 12 Sichuan earthquake (China) derived from Synthetic Aperture Radar: evidence for rupture on a blind thrust*. Geophysical Journal International, 183 (3), S. 1097 - 1103.
- Decker, B. L. (1986): *World Geodetic System 1984*. In: Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, 28.April – 2. Mai 1986, Austin, Texas, U. S. Band 1, S. 69 - 92.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1995a): *DIN 1319-1:1995-01 - Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1995b): *DIN 18709-1:1995-10 - Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen - Teil 1: Allgemeines*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1999): *DIN 21917: 1999-02 – Bergmännisches Risswerk Gebirgs- und Bodenbewegungen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- ESRI (2018): *ArcGIS Help - Mittlerer nächster Nachbar (ANN-Verfahren)*. Online Software Document (for ArcGIS 10.3): <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/average-nearest-neighbor.htm> [Zugriff am 29.12.2019].

European Space Agency - Sentinel-1 Team (2013): *Sentinel-1 User Handbook*. ESA User Handbook (Ref. GMES-SIOP-EOPG-TN-13-0001), Heft 1 (0. Revision).

European Space Agency (2019a): *ESA EO Missions: ENVISAT - Operations*. Online Document: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/operations> [Zugriff am 29.12.2019].

European Space Agency (2019b): *Sentinel User Guide - Interferometric Wide Swath*. Online Document: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath> [Zugriff am 28.12.2019].

Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. (1999): *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*. In: Proceedings of the IGARSS 1999, 28. Juni – 2. Juli 1999, Hamburg, Germany, S. 1528 - 1530.

Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. (2001): *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (1), S. 8 - 20.

Fialko, Y., Sandwell, D., Simons, M. & Rosen, P. (2005): *Three-dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit*. Nature, 435 (7040), S. 295 - 299.

Fialko, Y., Simons, M. & Agnew, D. (2001): *The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations*. Geophysical Research Letters, 28 (16), S. 3063 - 3066.

Fuhrmann, T. & Garthwaite, C. (2019): *Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion*. Remote Sensing, 11 (3), S. 1 - 21.

GAMMA Remote Sensing (2017): *Sentinel-1 processing with GAMMA software - Including an example of Sentinel-1 SLC co-registration and differential interferometry*. Gamma Documentation – User's Guide (Version 1.7, Dezember 2017).

Ge, N. (2010): *Ein Multi-Temporales L2-Norm-Basiertes Auswerteverfahren für SAR-Szenen-Stapel zur Ableitung von Bodenbewegung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. TU Clausthal

Geudtner, D., Torres, R., Snoeij, P., Ostergaard, A., Navas-Traver, I., Rommen, B. & Brown, M. (2013): *Sentinel-1 System Overview and Performance*. In: Proceeding of 'ESA Living Planet Symposium 2013', 9. - 13. September 2013, Edinburgh, UK, SP-277.

Ghiglia, D. C. & Pritt, M. D. (1998): *Two-dimensional phase unwrapping : theory, algorithms, and software*. 1. Auflage. Wiley, New York.

Haghighi, M. & Motagh, M. (2017): *Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping*. ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 142 (4), S. 245 - 256.

Hanssen, R. F. (2001): *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis - Remote Sensing and Digital Image Processing*. 1. Auflage. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.

Hejmanowski, R. & Kwinta, A. (2009): *Determining the coefficient of horizontal displacements with the use of orthogonal polynomials*. Archives of Mining Sciences, 54 (3), S. 441 - 454.

Hu, C.; Li, Y.; Dong, X.; Wang, R. & Cui, C. (2017): *Optimal 3D deformation measuring in inclined geosynchronous orbit SAR differential interferometry*. Science China: Information Sciences, 60 (6): 060303.

Hu, J.; Li, Z.; Ding, X.; Zhu, J.; Zhang, L. & Sun, Q. (2014): *Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review*. Earth-Science Reviews, Band 133, S. 1 - 17.

Hu, J.; Li, Z.; Zhu, J.; Ren, X. & Ding, X. (2010): *Inferring three-dimensional surface displacement field by combining SAR interferometric phase and amplitude information of ascending and descending orbits*. Science China: Earth Sciences, 53 (4), S. 550 - 560.

- Jung, H.-S. & Hong, S.-M. (2017): *Mapping three-dimensional surface deformation caused by the 2010 Haiti earthquake using advanced satellite radar interferometry*. PLoS ONE, 12 (11): e0188286.
- Jung, H., Lee, W. & Zhang, L. (2014): *Theoretical accuracy of along-track displacement measurements from multiple-aperture interferometry (MAI)*. Sensors, 14 (9), S. 17703-17724.
- Ketelaar, G. (2009): *Satellite radar interferometry: Subsidence Monitoring Techniques*. 1. Auflage. Springer Netherlands, Delft, The Netherlands.
- Klausing, H. & Holpp, W. (2000): *Radar mit realer und synthetischer Apertur: Konzeption und Realisierung*. 1. Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, Wien.
- Kratzsch, H. (2013): *Bergschadenskunde*. 6. Auflage. Deutscher Markscheider-Verein e. V., Bochum.
- Lazecký, M., Rapant, P., Perissin, D. & Bakoň, M. (2014): *Deformations of Highway over Undermined Ostrava-Svinov Area Monitored by InSAR Using Limited Set of SAR Images*. Procedia Technology, 16 (2014) S. 414 - 421.
- Liu, X.; Hu, J.; Sun, Q.; Li, Z. & Zhu, J. (2017): *Deriving 3-D time-series ground deformations induced by underground fluid flows with InSAR: Case study of Sebei Gas Fields, China*. Remote Sensing, 9 (11): 1129.
- Lohmar, F. (1988): *World geodetic system 1984 — geodetic reference system of GPS orbits*. In: Groten E., Strauß R. (eds.) GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying. Lecture Notes in Earth Sciences, Band 19. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- McGovern, A. (2003): *Geographic Distance and Azimuth Calculations*. Online Document: <https://www.codeguru.com/cpp/cpp/algorithms/article.php/c5115/Geographic-Distance-and-Azimuth-Calculations.htm> [Zugriff am 29.12.2019].
- Nelder, J. A. & Mead, R. (1965): *A simplex method for function minimization*. The Computer Journal, Band 7, S. 308 - 313.
- Niemeier, W. (2008): *Ausgleichsrechnung : statistische Auswertemethoden*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin.
- Pepe, A. & Calò, F. (2017): *A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements*. Applied Sciences (Switzerland), 7 (12): 1264.
- Pepe, A., Solaro, G., Calò, F. & Dema, C. (2016): *A Minimum Acceleration Approach for the Retrieval of Multiplatform InSAR Deformation Time Series*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9 (8), S. 3883 - 3898.
- Raspini, F., Loupasakis, C., Rozos, D. & Moretti, S. (2013): *Advanced interpretation of land subsidence by validating multi-interferometric SAR data: The case study of the Anthemountas basin (Northern Greece)*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 13 (10), S. 2425 - 2440.
- Refice, A.; Pasquariello, G.; Bovenga, F.; Festa, V.; Acquafredda, P. & Spilotro, G. (2016): *Investigating uplift in Lesina Marina (Southern Italy) with the aid of persistent scatterer SAR interferometry and in situ measurements*. Environmental Earth Sciences, Band 75: 243.
- Samieie-Esfahany, S., Hanssen, R. F., Van Thienen-Visser, K. & Muntendam-Bos, A. (2009): *On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates*. In: Fringe 2009 Workshop, 30. November - 4. Dezember 2009, Frascati, Italy.
- Samsonov, S. & d'Oreye, N. (2012): *Multidimensional time-series analysis of ground deformation from multiple InSAR data sets applied to Virunga Volcanic Province*. Geophysical Journal International, 191 (3), S. 1095 - 1108.
- Samsonov, S.; d'Oreye, N.; González, P.; Tiampo, K.; Ertolahti, L. & Clague, J. (2014): *Rapidly accelerating subsidence in the Greater Vancouver region from two decades of ERS-ENVISAT-RADARSAT-2 DInSAR measurements*. Remote Sensing of Environment, Band 143, S. 180 - 191.

Schäfer, M. (2012): *Atmosphäre als Phasenbestandteil der differentiellen Radarinterferometrie und ihr Einfluss auf die Messung von Höhenänderungen*. Dissertation TU Clausthal. In: Schriftenreihe des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.

Schober, F. (1982): *Die Berechnung von Bodenbewegungen über kavernenartigen Hohlräumen unter Beachtung der globalen Volumenkonvergenz*. Dissertation TU Clausthal. Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.

SNAP (2019): *SNAP 6.0-Help: Definition, Acronyms, Abbreviations*. Document intern des Softwares (Version SNAP 6.0).

Tofani, V., Raspini, F., Catani, F. & Casagli, N. (2013): *Persistent scatterer interferometry (PSI) technique for landslide characterization and monitoring*. Remote Sensing, 5 (3), S. 1045 - 1065.

Vajedian, S., Motagh, M. & Nilfouroushan, F. (2015): *StaMPS improvement for deformation analysis in mountainous regions: Implications for the Damavand volcano and Moshafault in Alborz*. Remote Sensing, 7 (7), S. 8323 - 8347.

Vincent, O., Bourbiguot, M., Johnsen, H. & Piantanida, R. (2019): *Sentinel-1 Product Specification*. ESA unclassified Document (Ref. S1-RS-MDA-52-7441), Heft 3 (6. Revision).

Walter, D. (2012): *Systematische Einflüsse digitaler Höhenmodelle auf die Qualität radarinterferometrischer Bodenbewegungsmessungen*. Dissertation TU Clausthal. Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld.

Wegmüller, U. (2005): *GAMMA IPTA Processing Example Luxemburg*. Gamma Remote Sensing Technical Report, GAMMA Remote Sensing, Gümligen, Switzerland.

Wegmüller, U.; Werner, C.; Strozzi, T.; Wiesmann, A.; Frey, O. & Santoro, M. (2016): *Sentinel-1 Support in the GAMMA Software*. Procedia Computer Science, Band 100, S. 1305 - 1312.

Welsch, W., Heunecke, O. & Kuhlmann, H. (2000): *Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungen*. 1. Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T. & Wiemann, T. (2003): *Interferometric point target analysis for deformation mapping*. In: 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 21. – 25. Juli 2003, Toulouse, France, S. 4362 - 4364.

Woodhouse, I. H. (2005): *Introduction to Microwave Remote Sensing*. 1. Auflage. CRC Press, Boca Raton, FL, U. S.

Wright, T., Parsons, B. & Lu, Z. (2004): *Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR*. Geophysical Research Letters, 31 (1): L01607.

Wu, C.; Barkan, B.; Huneycutt, B.; Leang, C. & Pang, S. (1981): *An Introduction to the Interim Digital SAR Processor and the Characteristics of the Associated SEASAT SAR Imagery*. JPL Publication 81-26, JPL, California Institute of Technology, Pasadena, U. S..

Xi, F. (2017): *Detektion von anormalen Zeitreihen an Persistent-Scatterer – Punkten im Zusammenhang mit der Ableitung flächenhafter Bodenbewegungen*. Dissertation TU Clausthal. Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.

Yin, X. & Busch, W. (2018): *Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings*. In: Busch, W. (Hrsg.): Tagungsband Geomonitoring 2018, 1. - 2. März 2018, Clausthal-Zellerfeld, S. 119 - 138.

Yin, X., Busch, W. & Walter, D. (2015): *Detektion von sprunghaften Messwertänderungen in PSI-Zeitreihen zur Bestimmung von Bodenbewegungen*. In: Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015, 7. - 9. Oktober 2015, Freiberg, Wagner Digitaldruck, Nossen, S. 181 - 195.

Yin, X., Linke, J., Busch, W. & Wan, X. (2018): *Automatisierte Charakterisierung des Bewegungsverhaltens von PS-Punkten zur spatio-temporalen Bodenbewegungsanalyse*. In: 19. Geokinematischer Tag, 17. und 18. Mai 2018. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen

und Geodäsie an der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2018-1, S. 88 - 103. Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, Nossen.

Yu, X., Hu, J. & Sun, Q. (2017): *Estimating Actual 2D Ground Deformations Induced by Underground Activities with Cross-Heading InSAR Measurements*. Journal of Sensors, Band 2017: 3170506.

Anhang I: Bodenbewegungsmodell der simulierten Senkungsmulde

Veränderungen im Untergrund führen meistens zur Veränderung der Erdoberfläche, insbesondere beim untertätigen Abbau und der Speicherung von Rohstoffen. Um solche Vorgänge auch mathematisch zu beschreiben, gibt es viele sog. Bodenbewegungsmodelle, die zur Vorausberechnung der orts- und zeitabhängigen Bodenbewegungen dienen. Die klassisch markscheiderischen Bodenbewegungsmodelle für die durch untertätige Hohlräume entstandenen Bodenbewegungen an der Erdoberfläche folgen dem Gedanken, dass sich eine Volumenveränderung durch die Schließung der Hohlräume im Untergrund, zum Teil, bis vollständig, an der Erdoberfläche ankommt. Durch verschiedene Verfahren, sowohl analytisch durch die Geometrie als auch numerisch durch Finite-Elemente-Methoden, werden solche Modelle unter Annahmen abgeleitet.

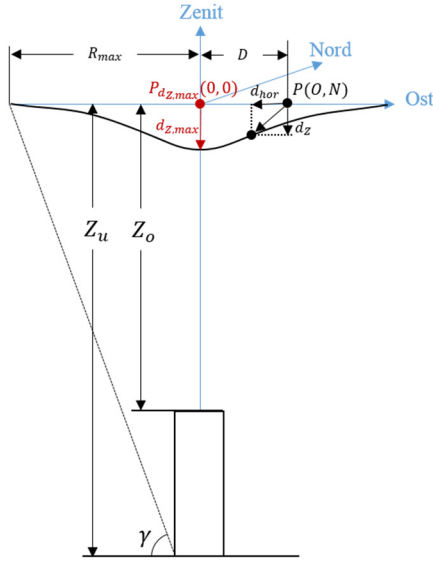
In dieser Arbeit wurde die theoretisch abgeleitete systematische Abweichung bei der Ermittlung von Bodenbewegungskomponenten mit LoS-Messungen zunächst durch eine Simulation dargestellt. Um eine realitätsnahe Senkungssituation nachzubilden, wurde das Bodenbewegungsmodell für die Senkungsvorausberechnung nach (Schober, 1982) für die Simulation der Höhenänderung verwendet. Nach dieser Modellvorstellung wird die Höhenänderung $d_z(O, N)$ an einem Ort $P(O, N)$ durch Formel A.1 berechnet:

$$d_z(O, N) = d_{z,max} \cdot e^{-\pi \frac{D^2}{Z_o \cdot Z_u} (\tan \gamma)^2} = d_{z,max} \cdot e^{-\pi \frac{O^2 + N^2}{Z_o \cdot Z_u} (\tan \gamma)^2} \quad \text{A. 1}$$

Dabei kann der Abstand zwischen dem Punkt P und dem Senkungsmittelpunkt mit D bezeichnet werden, während $d_{z,max}$ der maximalen Senkung am Senkungsmittelpunkt $P_{d_{z,max}}(0, 0)$ entspricht:

$$d_{z,max} = a \cdot \frac{V_{\text{Änderung}}}{Z_o \cdot Z_u} \cdot (\tan \gamma)^2 = a \cdot \frac{Z_u}{Z_o} \cdot \frac{V_{\text{Änderung}}}{R_{max}^2} \quad \text{A. 2}$$

Die Volumenänderung des Hohlraumes kann durch die Multiplikation der Konvergenz k und dem Hohlraumvolumen V ($V_{\text{Änderung}} = k \cdot V$) berechnet werden. Die gesamte Situation lässt sich durch die folgende Abbildung darstellen.



AI-1: Skizze der verwendeten Symbole des vereinfachten Bewegungsmodells

Hinzukommt kann die Schiefelage als partielle Ableitung der nach (Schober, 1982) gegebenen Senkungsfunktion berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 f(O, N, d_z) &= d_{z,max} \cdot e^{-\pi \frac{O^2 + N^2}{Z_o \cdot Z_u} (\tan \gamma)^2} - d_z \\
 \vec{n}_{O,N,d_z} &= (f_O, f_N, f_{d_z}) \\
 &= \left(\frac{-2\pi O \cdot (\tan \gamma)^2}{Z_o \cdot Z_u} \cdot d_{z,max} \cdot e^{-\pi \frac{O^2 + N^2}{Z_o \cdot Z_u} (\tan \gamma)^2}, \frac{-2\pi N \cdot (\tan \gamma)^2}{Z_o \cdot Z_u} \cdot d_{z,max} \cdot e^{-\pi \frac{O^2 + N^2}{Z_o \cdot Z_u} (\tan \gamma)^2}, -1 \right) \\
 T(O, N) &= \frac{\sqrt{f_O^2 + f_N^2}}{|f_{d_z}|} = \frac{2\pi}{Z_o \cdot Z_u} \cdot (\tan \gamma)^2 \cdot d_{z,max} \cdot e^{-\pi \frac{O^2 + N^2}{Z_o \cdot Z_u} (\tan \gamma)^2} \cdot \sqrt{O^2 + N^2}
 \end{aligned}
 \tag{A. 3}$$

Die Horizontalbewegung könnte sich nach der „Knothe Theory“ (Hejmanowski & Kwinta, 2009) mithilfe des sog. *B*-Koeffizients und der Schiefelage (Hejmanowski & Kwinta, 2009):

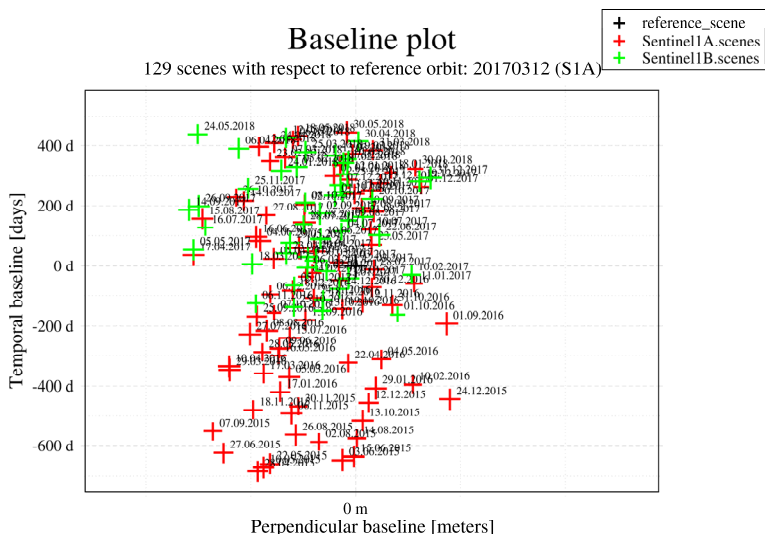
$$d_{hor} = -B \cdot T(O, N) \tag{A. 5}$$

Für das simulierte Beispiel in dieser Arbeit werden die in der Tabelle TI-1 aufgelisteten Parameter verwendet.

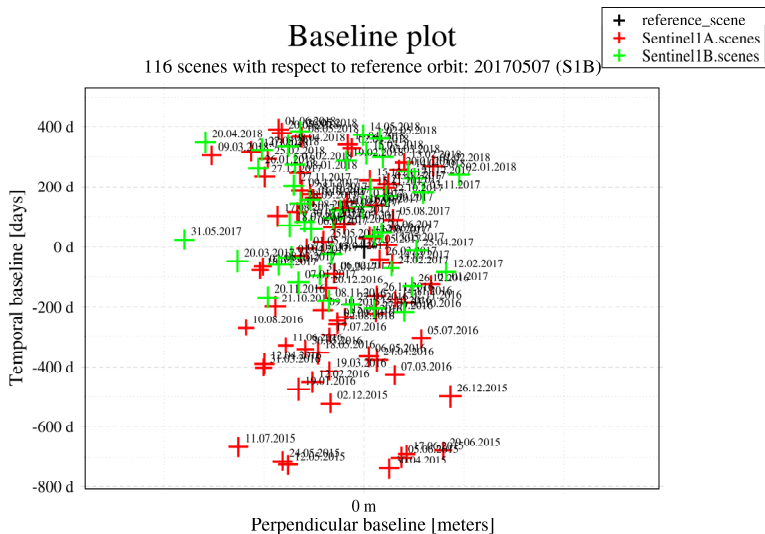
TI-1: Parameter des Bewegungsmodells für die Simulation der Senkungsmulde dieser Arbeit

| | |
|--|------------------------------|
| Teufe des Kavernendachs Z_o | 800 [m] |
| Teufe der Kavernensole Z_u | 1300 [m] |
| Übertragungsfaktor a | 1 |
| Hohlraumvolum V | 481056,37508 [m^3] |
| Konvergenz k | 0,01 |
| Die maximale Radius der Senkungsmulde R_{max} | 500 [m] |
| B -Koeffizient | $(\frac{0,15}{0,7}) \cdot D$ |

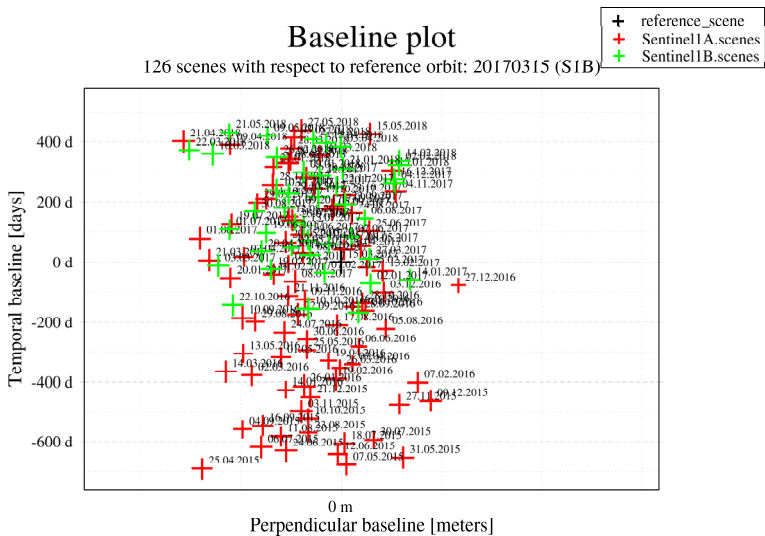
Anhang II: Basisliniendiagramme



AII-1: Basisliniendiagramm des verwendeten Radardatenstapels der „RO 15“ mit der Referenzszene am 12.03.2017



AII-2: Basisliniendiagramm des verwendeten Radardatenstapels der „RO 37“ mit der Referenzszene am 07.05.2017



AII-3: Basisliniendiagramm des verwendeten Radardatenstapels der „RO 139“ mit der Referenzscene am 15.03.2017

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Darstellung des dreidimensionalen Bewegungsvektors mit seinen Bewegungskomponenten am Beispiel einer Senkung..... | 10 |
| Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Senkungstrogos nach Rohstoffentnahme unter der Annahme eines homogenen und isotropen Untergrundes (Kratzsch 2013)..... | 14 |
| Abbildung 3: Betrachtung des Bewegungsprofils für den Senkungsschwerpunkt dZ Max im Zusammenhang mit den resultierenden Bewegungsmustern für den gesamten Senkungstrog (Kratzsch 2013)..... | 15 |
| Abbildung 4: Schematische Repräsentation eines seitlich blickenden abbildenden Radarsystems mit der Darstellung des Aufnahmebereiches (antenna footprint) einer Aufnahmestreife (swath) nach Woodhouse (2005) u. Walter (2012)..... | 20 |
| Abbildung 5: Darstellung der Bahnneigung eines inklinierten polarnahen Satellitenorbits und dazugehörigen Orbitspur auf der Erdoberfläche..... | 22 |
| Abbildung 6: Vergleich der Ascending und Descending Aufnahme eines rechtsblickenden Satelliten mit polarnaher Umlaufbahn in Süd-Nord-, bzw. Nord-Süd-Richtung..... | 23 |
| Abbildung 7: Projektion der Schrägäufentfernungsauflösung pr zur Bestimmung der Bodenauflösung pg | 25 |
| Abbildung 8: Zur Erläuterung des InSAR- und DInSAR-Verfahrens, basierend auf dem Vergleich einer Master- und einer Slaveaufnahme..... | 27 |
| Abbildung 9: Die zeitliche Phasenabwicklung mittels linearer Regression in der Dimension von Phase und Zeit..... | 33 |
| Abbildung 10: Zeit-Höhenänderungsdiagramm mit einem Phasenabwicklungsfehler in etwa der Mitte der Zeitreihe (siehe Pfeil)..... | 34 |
| Abbildung 11: Darstellung des (a) tatsächlichen Bewegungsverhaltens eines PS-Punktes im Vergleich zur (b) ausgewählten Regressionslösung, aufgrund der geringeren Standardabweichung der Regressionsgeraden von Phasenwerten..... | 35 |
| Abbildung 12: Blickrichtung eines satellitengestützten Radarsensors (LoS) am Beispiel einer Ascending-Aufnahme mit einem rechts blickenden Sensor..... | 36 |
| Abbildung 13: Blicklinien der Ascending- und Descending-Aufnahmen in einem dreidimensionalen Koordinatensystem..... | 37 |
| Abbildung 14: Darstellung der geometrischen Zusammenhänge zwischen Satellit und den Aufnahmestreifen mit Fokus auf (a) aald der azimuthalen Blickrichtung und (b) asq dem Squintwinkel..... | 38 |
| Abbildung 15: Darstellung der Koordinaten von Punkt PN näher (Near Range) und Punkt PF weiter (Far Range) am Satelliten mit Hinblick auf die Berechnung vom Azimut der Blickrichtung..... | 40 |
| Abbildung 16: Vereinfachte Ableitung des Einfallswinkels bezogen auf die Höhe h = 0 m nach (Walter, 2012)..... | 41 |
| Abbildung 17: Projektion eines Bewegungsvektors auf die Blicklinie des Sensors: direkte Projektionsumrechnung mit bekannten Zwischenwinkel von Bewegungs- und Blickrichtungsvektor..... | 43 |
| Abbildung 18: Projektion eines Bewegungsvektors auf die Blicklinie des Sensors: Summenbildung der auf die Blicklinie projizierten horizontalen und vertikalen Bewegungskomponenten des Bewegungsvektors..... | 44 |
| Abbildung 19: Projektion eines Bewegungsvektors auf die Blicklinie des Sensors: Summenbildung der einzelnen, auf die Blicklinie projizierten Komponenten des Bewegungsvektors..... | 45 |
| Abbildung 20: Verfügbare Zeiträume und Wiederholungsraten in Tagen der aktuellen SAR-Satelliten. (*Die Angaben zu den Wiederholungsraten von ALOS bezieht sich auf dem Zeitabstand zwischen zwei Aufnahmezyklen.)..... | 57 |
| Abbildung 21: Aufnahme Prinzip von Sentinel-1A/B (Geudtner, et al., 2013) (European Space Agency - Sentinel-1 Team, 2013)..... | 59 |
| Abbildung 22: Aufnahmestreifen von Sentinel-1 in Ascending- (rot) und Descending-Aufnahmerichtungen (blau)..... | 60 |
| Abbildung 23: Datenverfügbarkeit der Ascending-Aufnahmerichtung von Sentinel-1 im europäischen Raum..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 24: Datenverfügbarkeit der Descending-Aufnahmerichtung von Sentinel-1 im europäischen Raum..... | 61 |
| Abbildung 25: Verfügbarkeit der Aufnahmerichtungskombinationen von Sentinel-1 im europäischen Raum..... | 62 |
| Abbildung 26: Schematische Darstellung der horizontalbewegungsbedingten Abweichung. Schwarze Pfeile: Vektoren der Horizontalbewegungen mit gleicher Länge; Blaue und rote Pfeile: auf der horizontalen Blickrichtung des Sensors projizierte Horizontalbewegungen..... | 66 |
| Abbildung 27: Simulierte Senkungsmulde mit ihren Bewegungskomponenten gemäß einem Bewegungsmodell für Kavernen nach Schober (1982)..... | 68 |
| Abbildung 28: LoS-Bewegung der simulierten Senkungsmulde mit der Konstellation $\theta i, A = \theta i, D = 40^\circ$ für die beiden Aufnahmerichtungen und die Azimute der Blickrichtungen der Ascending-Aufnahme $80,39^\circ$ und der Descending-Aufnahmen $-80,14^\circ$ | 69 |
| Abbildung 29: Darstellung der aus Einzelaufnahmegeometrie ermittelten Höhenänderung und der Abweichung zur wahren Höhenänderung..... | 69 |
| Abbildung 30: Senkungsprofil der wahren Höhenänderung und der aus Einzelgeometrie ermittelten Höhenänderung aus (a) Ascending und (b) Descending..... | 71 |
| Abbildung 31: Perspektive der Blicklinie von Ascending- und Descending-Aufnahmen in (a) NO-Fläche (horizontal) und (b) ZO-Fläche (vertikal)..... | 73 |
| Abbildung 32: Azimute der Blickrichtungen bei Sentinel-1 in Abhängigkeit vom Abstand zum Sensor und der geographischen Positionen..... | 78 |
| Abbildung 33: Einfallswinkel bei Sentinel-1 in Abhängigkeit vom Abstand zum Sensor und der geographischen Positionen..... | 79 |
| Abbildung 34: Kombinatativ berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta i, A = \theta i, D = 40^\circ, aald, A = 78^\circ, aald, D = 2\pi - 78^\circ$ | 80 |
| Abbildung 35: Kombinatativ berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta i, A = \theta i, D = 40^\circ, aald, A = 81^\circ, aald, D = 2\pi - 81^\circ$ | 82 |
| Abbildung 36: Darstellung der ϵZ - und ϵO -Faktoren bei steigendem Azimut für (a) $\Delta\alpha = 0^\circ$ und $\theta i, A = \theta i, D = 40^\circ$, (b) $\Delta\alpha = 0^\circ$ und $\theta i, A = 40^\circ, \theta i, D = 39^\circ$ | 83 |
| Abbildung 37: Kombinatativ berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta i, A = \theta i, D = 40^\circ, aald, A = 81^\circ, aald, D = 2\pi - 78^\circ, \Delta\alpha = 3^\circ$ | 84 |
| Abbildung 38: Darstellung der ϵZ und ϵO -Faktoren bei steigendem Delta-Azimut für (a) $\Delta\alpha \leq 0^\circ$ und $\theta i, A = 40^\circ$, (b) $\Delta\alpha \geq 0^\circ$ und $\theta i, A = 40^\circ$ | 86 |
| Abbildung 39: Kombinatativ berechnete Höhenänderung (a) und die systematische Abweichung (b) in der ermittelten Höhenänderung bei der Winkelkombination $\theta i, A = \theta i, D = 30^\circ, aald, A = 80^\circ, aald, D = 2\pi - 80^\circ$; Kombinatativ berechnete Höhenänderung (c) und die systematische Abweichung (d) in der ermittelten Höhenänderung bei der Winkelkombination $\theta i, A = \theta i, D = 45^\circ, aald, A = 80^\circ, aald, D = 2\pi - 80^\circ$ | 88 |
| Abbildung 40: Darstellung der ϵZ - und ϵO -Faktoren bei steigendem Theta für (a) $aald, A = 80^\circ, aald, D = 2\pi - 80^\circ$ und $\theta i, A = \theta i, D = 30^\circ, 31^\circ, \dots, 45^\circ$ (b) $aald, A = 80^\circ, aald, D = 2\pi - 79^\circ$ und $\theta i, A = \theta i, D = 30^\circ, 31^\circ, \dots, 45^\circ$ | 89 |
| Abbildung 41: Kombinatativ berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta i, A = 30^\circ, \theta i, D = 40^\circ, aald, A = 80^\circ, aald, D = 2\pi - 80^\circ$ | 90 |
| Abbildung 42: Kombinatativ berechnete (a) Höhenänderung und (b) Ost-West-Bewegungskomponente, bzw. (c) die systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung und (d) die systematische Abweichung in der ermittelten Ost-West-Bewegungskomponente, bei der Winkelkombination $\theta i, A = 30^\circ, \theta i, D = 45^\circ, aald, A = 80^\circ, aald, D = 2\pi - 80^\circ$ | 91 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 43: Darstellung der εZ - und εO -Faktoren bei steigendem Azimut für $\alpha ald, A = 80^\circ, \alpha ald, D = 2\pi - 80^\circ$ und (a) $\theta i, A = 30^\circ, \Delta\theta = -15^\circ, -14^\circ, \dots, 0^\circ$ (b) $\theta i, A = 45^\circ, \Delta\theta = 0^\circ, 1^\circ, \dots, 15^\circ$ | 92 |
| Abbildung 44: Winkelbereiche für einen Fehler $<10\%$ für die Ost-West-Bewegungskomponenten für (a) $C>1$ und (b) $C=1$ | 98 |
| Abbildung 45 Süd-Nord-Profil und West-Ost-Profil der wahren und kombinatativ berechneten Höhenänderung. (a) Süd-Nord-Profil (die Profilsur geht von Süden nach Norden) durch die Senkungsmitte (Ost-Koordinate = 495 m); (b) West-Ost-Profil durch den Punkt mit der maximalen Nord-Süd-Bewegung im Süden (Ost-Koordinate = 275 m) | 98 |
| Abbildung 46 Süd-Nord-Profil der wahren und kombinatativ berechneten Höhenänderung in zunehmenden Abständen zur Senkungsmitte | 100 |
| Abbildung 47: Darstellung der ζZ - und ζO -Faktoren bei steigendem Azimut für (a) $\alpha ald, A = \alpha ald, D = 78^\circ, 79^\circ, \dots, 81^\circ$ und $\theta i, A = \theta i, D = 40^\circ$, (b) $\alpha ald, A = 80^\circ, \alpha ald, D = 2\pi - 80^\circ$ und $\theta i, A = \theta i, D = 30^\circ, 31^\circ, \dots, 45^\circ$ | 103 |
| Abbildung 48: Perspektive der Blicklinie von zwei Ascending-Aufnahmen mit verschiedenen Einfallswinkeln in (a) NO-Fläche und (b) ZAz-Fläche (vertikal) | 106 |
| Abbildung 49: Darstellung des $\varepsilon Z, \text{teta}$ -Faktors bei (a) $\theta i, A1 = 30^\circ, \Delta\theta = 1^\circ, 2^\circ, \dots, 15^\circ$, (b) $\Delta\theta = 5^\circ, \theta i, A1 = 30^\circ, 31^\circ, \dots, 40^\circ$ | 109 |
| Abbildung 50: Berechnete systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung des Ascending-Ascending-Ansatzes bei einer Azimut-Differenz von 3° und einer Einfallswinkelkombination von (a) 30° und 35° , (b) 30° und 41° | 110 |
| Abbildung 51: Berechnete systematische Abweichung in der ermittelten Höhenänderung unter der Einfallswinkelkombination von 30° und 35° bei (a) einer Azimut-Differenz von 1° für Ascending-Ascending, (b) einer Azimut-Differenz von 2° für Descending-Descending | 111 |
| Abbildung 52: Das Untersuchungsgebiet im Überlappungsbereich der vier Tracks | 116 |
| Abbildung 53: Darstellung der verfügbaren und fehlenden Radarszenen der ausgewählten Tracks | 117 |
| Abbildung 54: Intensitätsbild (Multilook 3×1) der Radarszenen am 02.12.2016 aus dem RO-37 als Beispiel des Fokussierungsfehlers | 118 |
| Abbildung 55: Interpolierte Darstellung der jeweiligen Einfallswinkel der verwendeten Tracks über dem Untersuchungsgebiet | 120 |
| Abbildung 56: Prozesskette der kombinativen Berechnung von Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponente (mit zwei sich kreuzenden Tracks) | 121 |
| Abbildung 57: Prozesskette der kombinativen Berechnung von Höhenänderungen (mit zwei parallelen Tracks) | 124 |
| Abbildung 58: LoS-Bewegungsraten (mm/Jahr) der PSI-Ergebnisse aus den RO-37-, RO-139- und RO-15-Datenstapeln | 127 |
| Abbildung 59: Höhenänderungsraten (mm/Jahr) der PSI-Ergebnisse aus den RO-37-, RO-139- und RO-15-Datenstapeln | 128 |
| Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung einer LoS-Bewegung der unbereinigten PSI-Ergebnisse von RO-37, RO-139 und RO-15 | 130 |
| Abbildung 61: LoS-Bewegungsraten der herausgenommenen PS-Punkte von RO-37, RO-139 und RO-15 nach $s0$ -Kriterium | 131 |
| Abbildung 62: LoS-Bewegungsraten der herausgenommenen PS-Punkte von RO-37, RO-139 und RO-15 mittels der Clusteranalyse nach Xi (2017) | 132 |
| Abbildung 63: Schematische Darstellung der Signifikanzprüfung eines Kandidatenzeitpunktes (roter Punkt) mittels einer linearen Regression für die Zeitabschnitte mit 7 Aufnahmen vor (grüne Punkte) und nach (blaue Punkte) dem Kandidatenzeitpunkt | 133 |
| Abbildung 64: LoS-Bewegungsraten der herausgenommenen PS-Punkte bei der Detektion der abrupten Messwertveränderungen | 134 |
| Abbildung 65: LoS-Bewegungsraten (mm/Jahr) der bereinigten PSI-Ergebnisse von den RO-15-, RO-139- und RO-37-Datenstapeln | 135 |
| Abbildung 66: Mittels der Trendpolynomfunktion abgeleitete Gesamthöhenänderung im Zeitraum 04/2015 – 05/2018 aus den kombinativen Berechnungen | 137 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 67 Beispielhafte Zeitreihen der kombinativ berechneten Höhenänderungen aus den zwei Verfahren (drei Konstellationskombinationen) | 140 |
| Abbildung 68: Räumliche Darstellung der Verteilung der Polynomgrade der Trendpolynomfunktionen für die Höhenänderungen | 141 |
| Abbildung 69: Mittels der Trendpolynomfunktion abgeleitete Ost-West-Bewegungskomponenten im Zeitraum 04/2015 – 05/2018 aus den kombinativen Berechnungen..... | 143 |
| Abbildung 70: Beispielhafte Zeitreihen der kombinativ berechneten Ost-West-Bewegungskomponente (a und b) und die entsprechenden Höhenänderungen (c und d) | 145 |
| Abbildung 71: Räumliche Darstellung der Verteilung der Polynomgrade der Trendpolynomfunktionen für die Ost-West-Bewegungskomponenten | 146 |
| Abbildung 72: Jahresscheiben der Gesamthöhenänderung der jeweiligen kombinativen Berechnung | 149 |
| Abbildung 73: Jahresscheiben der gesamten Ost-West-Bewegungskomponente der jeweiligen kombinativen Berechnung | 150 |
| Abbildung 74: Fokussierte Darstellung der IDW-interpolierten Gesamthöhenänderung der kombinativen Berechnungen | 152 |
| Abbildung 75 Fokussierte Darstellung der IDW-interpolierten gesamten Ost-West-Bewegungskomponente der kombinativen Berechnungen | 153 |
| Abbildung 76: Mittels Tiefpasses gefilterte IDW-interpolierte Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen der kombinativen Berechnungen | 154 |
| Abbildung 77: Isolinien Darstellung der Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen der kombinativen Berechnungen | 155 |
| Abbildung 78: Angesetzte Profilsuren auf den überlagerten Ergebnissen der Isolinien Ermittlung | 156 |
| Abbildung 79: West-Ost-Profile der Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungskomponenten für die kombinativen Berechnungen von RO-15 & RO-37 und RO-15 & RO-139 | 159 |
| Abbildung 80: Süd-Nord-Profile der Höhenänderungen für die kombinativen Berechnungen von RO-15 & RO-37 und RO-15 & RO-139 | 161 |
| Abbildung 81: Räumliche Verteilung der Standardabweichung s_0 der Höhenänderungen der jeweiligen kombinativen Berechnung | 164 |
| Abbildung 82: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung einer gitterbasierten Höhenänderung (mm) aus der kombinativen Berechnung (a) mit sich kreuzenden Tracks; (b) mit parallelen Tracks | 165 |
| Abbildung 83: Räumliche Verteilung der Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen (mm) | 169 |
| Abbildung 84: Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen abgeleitet aus dem jeweils ersten und letzten Funktionswert der Trendfunktion einer Zeitreihe und ihren Standardabweichungen | 170 |
| Abbildung 85 Mittels der Trendpolynomfunktion abgeleitete, signifikante Gesamthöhenänderung im Zeitraum 04/2015 – 05/2018 aus den kombinativen Berechnungen..... | 171 |
| Abbildung 86: Räumliche Verteilung der Standardabweichung s_0 der Ost-West-Bewegungskomponenten der beiden kombinativen Berechnung..... | 172 |
| Abbildung 87: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung einer gitterbasierten Ost-West-Bewegungskomponente (mm) | 173 |
| Abbildung 88: Räumliche Verteilung der Standardabweichungen der gesamten Ost-West-Bewegungskomponente (mm) | 175 |
| Abbildung 89: Standardabweichungen der Differenzen der Ost-West-Bewegungskomponente abgeleitet aus dem jeweils ersten und letzten Funktionswert der Trendfunktion einer Zeitreihe .. | 176 |
| Abbildung 90: Mittels der Trendpolynomfunktion abgeleitete, signifikante gesamte Ost-West-Bewegungskomponente im Zeitraum 04/2015 – 05/2018 aus den kombinativen Berechnungen.. | 177 |
| Abbildung 91: ϵ -Faktoren der verschiedenen Konstellationskombinationen | 178 |
| Abbildung 92: Größenordnungen (mm) der systematischen Abweichungen in kombinativ berechneten Höhenänderungen und Ost-West-Bewegungen der verschiedenen Kombinationen, bei einer stetigen Nord-Süd-Bewegung von 50 mm über das Untersuchungsgebiet, für einen bestimmten Zeitraum | 180 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 93: Vereinfachte Modellvorstellung zur Findung der Senkungsmitte..... | 184 |
| Abbildung 94: Profilsuren zur Identifikation der Senkungsmitte (schwarze Linien), mit der Gesamthöhenänderung der Gitterpunkte von der Kombination „RO-15 & RO-37“ als Hintergrund | 187 |
| Abbildung 95: Höhenänderungsprofile mit den jeweiligen angepassten Polynomkurven..... | 189 |
| Abbildung 96 Standardabweichung eines Messwertes in einem Profil..... | 190 |
| Abbildung 97: Polynomkurven der Höhenänderungsprofile mit dem ermittelten Senkungsmaximum | 191 |
| Abbildung 98: Ermittelte Senkungsmaxima aus Süd-Nord- (gelb) und West-Ost-Profilsuren (rot) | 192 |
| Abbildung 99: Abgeschätzte Nord-Süd-Bewegung des Senkungsgebietes für den gesamten Untersuchungszeitraum..... | 194 |
| Abbildung 100: Standardabweichungen der abgeschätzten Nord-Süd-Bewegung des gesamten Untersuchungszeitraums..... | 197 |
| Abbildung 101: Signifikante, abgeschätzte Nord-Süd-Bewegung des Senkungsgebietes für den gesamten Untersuchungszeitraum..... | 199 |
| Abbildung 102: Die systematischen Abweichungen für den gesamten Zeitraum, berechnet aus der ermittelten Nord-Süd-Bewegungskomponente | 202 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: Auflistung und Beschreibung möglicher Bewegungsarten im Senkungsfall | 11 |
| Tabelle 2: Bekannte Verfahren zur Ermittlung von Bodenbewegungen und deren Einsatzmöglichkeiten | 50 |
| Tabelle 3: Offizielle Angaben des mittleren Einfallswinkels von Sentinel-1 bezogen auf den jeweiligen Aufnahmestreifen (European Space Agency, 2019b) | 79 |
| Tabelle 4: Übersicht der nutzbaren Radardaten aus RO-15, RO-139 und RO-37 | 119 |
| Tabelle 5: Azimute der Blickrichtung der genutzten Datenstapel | 120 |
| Tabelle 6: herausgenommene Radarszenen bei der Detektion der PS-Kandidaten | 126 |
| Tabelle 7: Ergebnis der Datenbereinigung | 134 |
| Tabelle 8: Durchschnittliche Abstände der PS-Punkte zu deren nächsten Nachbarpunkt und statistische Übersicht der Radien, womit ein PS-Punkt mindestens 8 nächst benachbarte PS-Punkte finden kann, für die drei bereinigten PSI-Ergebnisse | 136 |
| Tabelle 9: Ermittelte Polynomgrade der gitterbasierten Höhenänderungszeitreihen | 141 |
| Tabelle 10: Ermittelte Polynomgrade der gitterbasierten Ost-West-Bewegungskomponente | 146 |
| Tabelle 11: Statistische Parameter (gerundet) der Standardabweichungen s_0 einer kombinativ berechneten Höhenänderung | 166 |
| Tabelle 12: Statistische Parameter (gerundet) der Standardabweichungen s_0 einer kombinativ berechneten Ost-West-Bewegungskomponente | 173 |
| Tabelle 13: ε -Faktoren der verschiedenen Konstellationskombinationen | 178 |
| Tabelle 14: Ermittelte Koordinaten der Senkungsmittle im lokalen Koordinatensystem und deren Unsicherheiten | 193 |

Symbolverzeichnis

| | | |
|--------------------------------------|--|------|
| α_{ald} | Azimet der Blickrichtung | [°] |
| $\alpha_{\tilde{d}}$ | Azimet der Horizontalbewegung | [°] |
| α_{gt} | Azimet der auf der Referenzfläche projizierten Spur der Flugbahn | [°] |
| α_{sq} | Squintwinkel | [°] |
| B | Räumliche Basislinie | [m] |
| B_p | Bandbreite in Range | [Hz] |
| B_{\perp} | Senkrechte Basislinie | [m] |
| c | Lichtgeschwindigkeit | [c] |
| \vec{d} , $\vec{d}(O, N, Z, t)$ | Dreidimensionaler Bewegungsvektor, in der Abhängigkeit von der dreidimensionalen Lage des sich bewegenden Punktes und der Zeit | |
| \vec{d}_0 | Einheitsvektoren des Bewegungsvektors | |
| d_{hor} | Horizontalbewegung | [mm] |
| d_{LoS} | Bewegung in der LoS-Richtung | [mm] |
| d_N | Bodenbewegungskomponente in der Nord-Süd-Richtung | [mm] |
| d_O | Bodenbewegungskomponente in der Ost-West-Richtung | [mm] |
| d_{Rg} | Horizontale Bewegungskomponente in der horizontalen Blickrichtung des Sensors | [mm] |
| d_Z | Bodenbewegungskomponente in der Lotrichtung, Höhenänderung | [mm] |
| Δ | Systematische Abweichung | [mm] |
| $\Delta\alpha$ | Differenz zwischen den Beträgen der beiden Azimute der Blickrichtungen mit $\alpha_{ald,A} = 2\pi - \alpha_{ald,D} + \Delta\alpha$ | [°] |
| $\Delta d_{Z,Max}$ | Theoretisch detektierbare Höhenänderung | [mm] |
| $\Delta\theta_i$ | Differenz der Einfallswinkel | [°] |
| ε | Konstellationsbedingte ε -Faktor der systematischen Abweichung in der ermittelten Bodenbewegungskomponente | |
| ε_h | Höhenfehler | [mm] |
| θ_d | Depressionswinkel | [°] |
| θ_i | Einfallswinkel | [°] |
| θ_l | Blickwinkel | [°] |
| H_{Sat} | Höhe des Satelliten | [m] |
| L_a | Länge der realen SAR-Antenne | [m] |
| \overrightarrow{LoS} | Einheitsvektoren der Blicklinie | |
| λ | Wellenlänge des Signals | [m] |
| n_{pf} | Anzahl der ausgeglichenen Messwerte (Beobachtungen) | |
| O, N, Z | Dreidimensionale Lageangabe bzgl. eines an der Lotrichtung orientierten Koordinatensystems mit den Ost-West (O), Nord-Süd- (N) und Zenit-Nadir- (Z) Achsen | [m] |
| R | Schrägdistanz zwischen Sensor und Objekt | [m] |

| | | |
|----------------|---|-----------|
| $R_{E,P}$ | Abstand zwischen dem Punkt P auf demselben Referenzellipsoid und dem Mittelpunkt der Erde | [m] |
| $R_{E,S}$ | Abstand zwischen der Bodenposition des Satelliten auf dem mittleren Referenzellipsoid und dem Mittelpunkt der Erde | [m] |
| R_{S-P} | Abstand zwischen dem Satelliten und dem Punkt P | [m] |
| ρ_a^{RAR} | Geometrische Auflösung in Azimut bei einem realen Apertur | [m] |
| ρ_a^{SAR} | Geometrische Auflösung in Azimut bei einem synthetischer Apertur | [m] |
| ρ_g | Geometrische Auflösung in Ground-Range | [m] |
| ρ_r | Geometrische Auflösung in Slant-Range | [m] |
| s | Standardabweichung | [mm] |
| ς | Konstellationsbedingter ς -Faktor der statistischen Unsicherheit der ermittelten Bodenbewegungskomponente | [°] |
| t | Zeit | [s] |
| τ_e | Effektive Impulslänge | [s] |
| τ_p | Sendeimpulsdauer | [s] |
| u_{pf} | Die Anzahl der Unbekannten des Polynoms | |
| v_{LoS} | Geschwindigkeit der LoS-Bewegung | [mm/Jahr] |
| v_{pf} | Restverbesserung entlang eines Profils | [mm] |
| ϕ | Phasenlage des eintreffenden Signals | [rad] |
| φ | Interferometrische Phasen | [rad] |
| ϑ | Ergänzungswinkel zum Winkels zwischen der Bewegungsrichtung und der Blickrichtung des Sensors | [°] |

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich gerne meinem Doktorvater, Herr Prof. Busch, für die langjährige Unterstützung während meines Studiums und der Beschäftigung als Mitarbeiterin danken. Er hat mich zu diesem weiteren wissenschaftlichen Weg geführt und mir großartigen Fortbildungen für mein Leben gegeben. Das Resultat der Anstrengungen befindet sich in meiner Dissertation, welche Sie nun in den Händen halten. Auch möchte ich gerne Prof. Paffenholz als weiteren Gutachter danken. Trotz der kurzen gemeinsamen Zeit während der Fertigstellung der Arbeit waren seine Vorschläge und Anregungen sehr konstruktiv und hilfreich.

Ein großer Dank geht auch an meine Familie, insbesondere an meine Eltern und meinen Mann Hendrik, ohne deren Motivation der Abschluss dieser Dissertation nicht möglich gewesen wäre.

Danke auch an meine zahlreichen Kollegen des Institutes für die hitzigen Gespräche in der Kaffeeküche. Besonders möchte ich als langjährige Kollegin Dr. Diana Walter erwähnen, mit der die gemeinsame Projektarbeit auch zu später Stunde leicht von der Hand ging. Danke auch an Thomas Engel, dessen Gespräche so manche Pause auf ganze Nachmittage ausgeweitet haben, die die wissenschaftlichen Sichten erweitern. Liebe Annemarie, auch dir gebührt mein Dank für die Herzlichkeit mit der du uns alle angetrieben hast. Danke allen, die mich bei der Promotion begleitet und geduldet haben. Danke allen, die mir in den letzten Jahren durch Projekte und Arbeiten wertvolle Wissensaustauschen und herzhafte Hilfen gegeben haben.